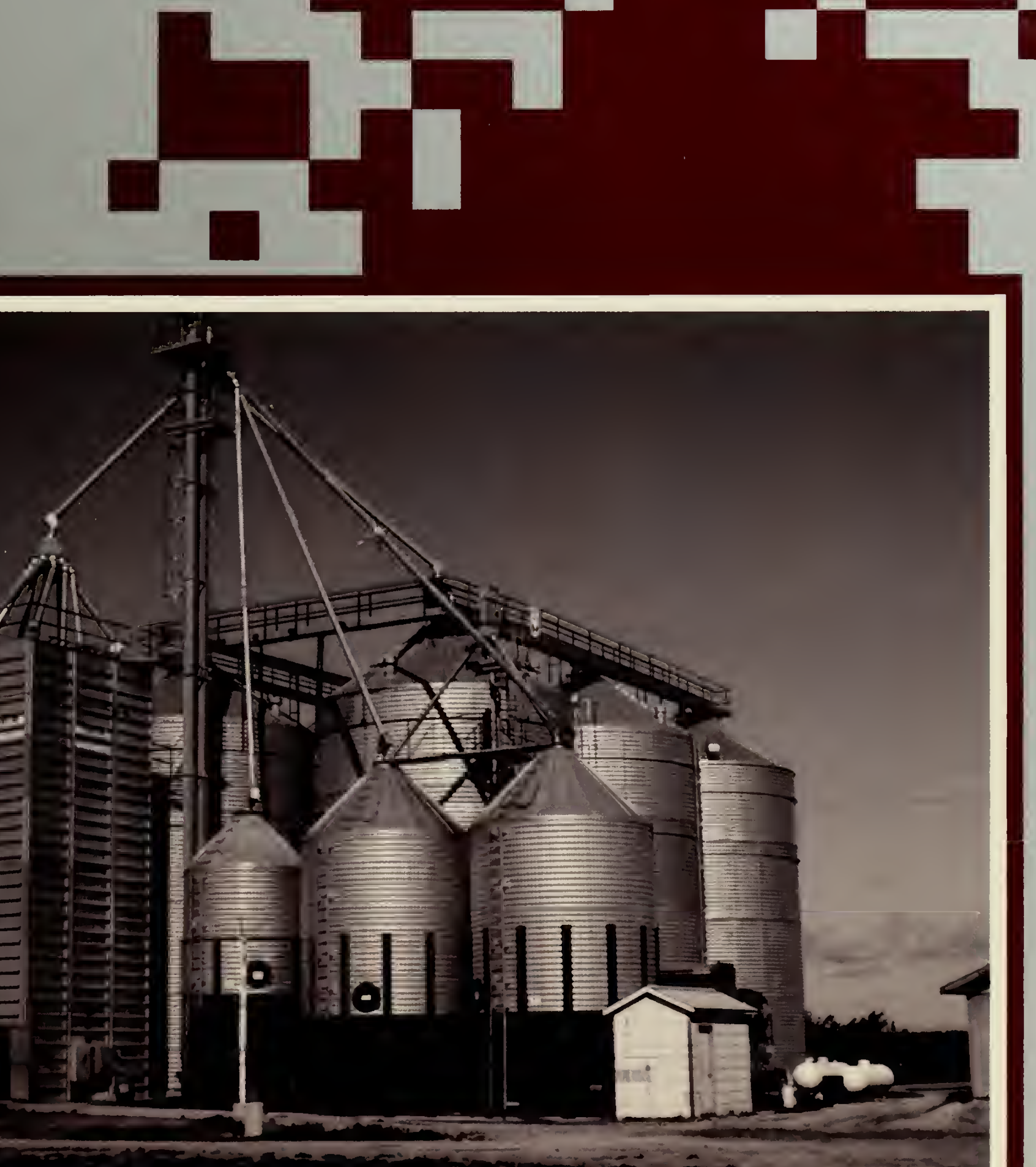
Agriculture
Canada

La détérioration et l'échauffement des produits agricoles entreposés



Comment les prévenir,
les détecter
y remédier



Publication 1823F
1989



La détérioration et l'échauffement des produits agricoles entreposés

Comment les prévenir, les détecter et y remédier

J.T. Mills
Station de recherches, Winnipeg, Man.

Direction générale de la recherche
Agriculture Canada

En vente au Canada par l'entremise de nos Agents libraires agréés et autres librairies

ou par la poste au :

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa, Canada K1A 0S9

(Prix sujet à changement sans préavis)

N° de catalogue A53-1823/1988F

ISBN 0-660-92486-2

Rédacteur-éditeur
Normand Rousseau

Donnés de catalogage avant publication (Canada)
Mills, J.T. (John T.)
La détérioration et l'échauffement des produits agricoles entreposés

(Publication ; 1823F)

Publié aussi en anglais sous le titre: Spoilage and heating of stored agricultural products.
Comprend un index.
Bibliographie : p. 103

1. Produits agricoles — Entreposage — Maladies et dommages.
I. Titre. II. Collection: Publication (Canada.
Agriculture Canada). Français ; 1823F

SB129.M54 1989 631.5'68
C89-099203-7

Même si les données contenues dans ce manuel ont été soigneusement vérifiées, ni l'auteur ni Agriculture Canada ne se tiennent responsables de quelque problème que ce soit qui puisse être la conséquence de la mise en application de ces données. La mention expresse d'un produit, d'une marque commerciale ou d'une compagnie ne signifie pas que le Gouvernement du Canada ou Agriculture Canada s'en portent garants.

Les recommandations de la présente publication sur l'usage des pesticides ne sont données qu'à titre d'indication. Toute application d'un pesticide doit être conforme au mode d'emploi inscrit sur l'étiquette du produit, comme le prescrit la *Loi sur les produits antiparasitaires.*
Il faut toujours lire l'étiquette.
Un pesticide doit aussi être recommandé par les autorités provinciales. Les modes d'emploi recommandés pouvant varier d'une province à l'autre, consulter le représentant agricole de la province pour obtenir des conseils particuliers.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE

La majorité des produits agricoles est entreposée dans des conditions de bonne conservation, avec le minimum de pertes en qualité. Chaque année, cependant, une petite proportion de ces produits se détériore ou s'échauffe spontanément (auto-échauffement) avec, pour conséquence, un déclassement du produit ou autre perte de qualité. Quelques cas, notamment des incendies, sont beaucoup plus graves et peuvent se traduire par des pertes importantes de produits, des dommages aux installations et des blessures corporelles.

Certaines denrées sont plus sensibles que d'autres à la détérioration et à l'auto-échauffement, ce qui peut entraîner des ennuis sérieux pour la personne qui en est responsable et qui n'est pas familiarisée avec le comportement de ces denrées en cours de manutention et d'entreposage. Il est souvent difficile, malheureusement, d'obtenir des renseignements sur la façon de remédier à la situation lorsque se produit un problème d'échauffement ou de détérioration.

L'objectif de ce manuel est de fournir l'information essentielle sur les causes de la détérioration, de l'auto-échauffement et de l'auto-inflammation des denrées agricoles entreposées, ainsi que sur les méthodes utilisées pour les prévenir, les détecter et y remédier. En outre, ce manuel vise à fournir des renseignements sur les méthodes de traitement de ces problèmes et sur le comportement des denrées en cours d'entreposage.

Ce manuel est un guide pour les fermiers, les exploitants d'élévateurs et de minoterie, les magasiniers, les travailleurs des installations agricoles, ainsi que les exportateurs qui ont à résoudre des problèmes d'entreposage. Il est également destiné aux pompiers, policiers, évaluateurs d'assurance, et à tous les responsables de la sécurité et de la santé au travail qui ne disposent habituellement que d'une information très morcelée et insuffisante lorsqu'ils doivent prendre des décisions.

Ce manuel comprend deux parties. La premiere traite des modifications que subissent les produits pendant l'entreposage, de l'auto-échauffement, des effets des moisissures, des problèmes de détérioration et d'échauffement, et suggère des moyens de les prévenir, de les détecter et d'y remédier. Cette partie traite aussi de la sécurité, des méthodes d'enquête sur les problèmes et enfin, des aspects juridiques. La deuxième partie présente un relevé détaillé des caractéristiques d'entreposage de certaines denrées en particulier.

Étant donné que nous ne disposons pas de cas bien documentés portant sur des problèmes de détérioration et d'échauffement, les mêmes erreurs de gestion peuvent se produire en ce qui a trait à l'isolation des silos et des cellules dans différentes régions du Canada. Espérons que ce manuel connaîtra d'autres éditions qui comprendront des expériences bien documentées de détérioration et d'échauffement. À vous, lecteurs, de nous en faire part pour le plus grand bénéfice de tous.

De nombreuses personnes nous ont fourni des renseignements précieux et donné de judicieux conseils au cours de la préparation de ce manuel. Ce sont E. Dorge, Saint-Agathe (Man.); J. Elvidge, Vancouver (C.-B.); J. Davies, Halifax (N.-É.); R.A. Meronuck, Saint-Paul (Minn.); H. Uustalu, Thunder Bay (Ont.); J. van Loon, Winnipeg (Man.); et I.K. Walker, Lyttelton, (Nouvelle-Zélande). C. Reading de la Fire Protection Association de Londres (Royaume-Uni) et M. Malyk du Centre de recherches d'Agriculture Canada, Winnipeg (Man.), ont été d'un grand secours pour la recherche des sources bibliographiques.

N.D.G. White, Centre de recherches de Winnipeg (Man.), a révisé entièrement le manuel et nous a fait des suggestions utiles. Les personnes suivantes ont révisé certains chapitres particuliers, en y ajoutant certains renseignements supplémentaires : M.G. Britton, G. Elias, C.F. Framingham, G. Henry, D.S. Jayas, S.J. Kirkland, A. MacDonald, J.R. Matheson, W.E. Muir, R.H. Nelles, J.R. Rogalsky et N.D.G. White, tous de Winnipeg; J. Davies de Halifax (N.-É), R.A. Meronuck de Saint-Paul (Minn.) et J. Tuite de West Lafayette (Ind.). J. Irvine de la Faculté de droit de l'Université du Manitoba a vérifié et remanié le tableau 9 du point de vue juridique.

C. Letain, L. Reece et B. Snell, toutes trois de la Station de recherches de Winnipeg, ont préparé de nombreuses versions préliminaires sur traitement de textes. R. Sims de la même station a fait les dessins et les photos. Normand Rousseau du Service aux programmes de recherche, Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, à Ottawa, a édité la version française du manuel.

Nous adressons nos plus sincères remerciements aux responsables des publications suivantes qui nous ont permis gracieusement de reproduire : le tableau 1 ainsi que d'autres citations proviennent du *Guide officiel d'agréage des grains*, 1987, Commission canadienne des grains, à Winnipeg; le tableau 2, extrait du *Tableau des matières sujettes à l'échauffement spontané*, publ. 492, National Fire Protection Association, Boston (Maine); le tableau 5 et les figures 15 et 16 proviennent de *Management of on-farm stored grain*, University of Kentucky; le tableau 10 a été tiré de *Gas poisoning on the farm*, Agriculture Canada, publ. 1688; une partie du tableau 15 et une certaine partie de texte ont été empruntées à *Drying and storage of agricultural crops*, Van Nostrand Reinholt Company Inc.; une partie du tableau 15 ainsi que les tableaux 16 et 17 proviennent de *Drying and storing grains, seeds and pulses in temperate climates*, Institute for

Storage and Processing of Agricultural Produce; le tableau 20 vient de *Soyabean storage in farm-type bins*, Illinois Agricultural Experiment Station Bulletin 553; les figures 4 et 6 ont été tirées de *Fire Safety with silos*, Fire Protection Association; la figure 7 vient de *Managing dry grain in storage*, Midwest Plan Service; la figure 8 et le texte viennent de *Evaluation of a remote moisture sensor for bulk grain*, Academic Press; la figure 10 a été empruntée du *Catalog No. 80* du Seedburo Equipment Co.; la figure 11 vient de Vana Industries, Winnipeg; la figure 12*a* et le texte viennent de *Grain handling and storage* avec l'autorisation de Elsevier Science Publishers B.V. et G. Boumans; la figure 14 et le texte sont empruntés à *Extinguishing a silo fire by nitrogen purging*, Getreide Mehl und Brot; la figure 22 et son texte viennent de *Problems of storing grain from temperate climates in tropical countries... history*, CS Publications Ltd.; la figure 23 et le texte viennent de *Spontaneous heating and the damage it causes...soybeans in Israel*, Pergamon Journals Ltd; la figure 24 et le texte viennent de *Country guide*; un extrait vient de *Foam, CO_2, and water used against deep fire in maize cargo*, Unisaf Publications Ltd.; un autre extrait vient de *Fungal deterioration of dried barley malt in international trade* paru dans C.A.B. International; un texte vient de *NIOSH alert*: *Request for assistance in preventing fatalities due to fires and explosions in oxygen-limiting silos*, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH); il y a plusieurs citations de *Storage of cereal grains and their products*, American Association of Cereal Chemists Ltd.; une description de *Spontaneous heating of stored cotton seeds*, S. Navarro; un extrait de *Grain storage*: *Physical and chemical consequences of advanced spontaneous heating in stored soybeans*, American Chemical Society; un extrait de *Marine Fire Prevention, firefighting and fire safety*, Prentice-Hall Inc.; un texte de *Fire Investigation*, Pergamon Books Ltd.; un texte de *Detection of grain silofires using thermography* AGEMA Infrared Systems; un texte de *Handling commodities in transit*, Sosland Publishing Company; des informations tirées de *Heated-air grain dryers* et de *Grain aeration and unheated air drying*, O.H. Friesen et Manitoba Agriculture; un extrait de l'article intitulé *Fishmeal strikes again, Hazardous Cargo Bulletin*; plusieurs citations du livre *Grain Storage*, University of Minnesota Press; et une citation tirée de *Alleged mycotoxicosis in swine*: *Review of a court case*, Canadian Veterinary Journal.

Ce manuel est dédié à ma femme Carol, en raison de l'encouragement et de l'aide qu'elle m'a apportés pendant mes travaux.



Première Partie

Principes mis en jeu

Chapitre 1 Changements se produisant en cours d'entreposage

PRINCIPES

Les produits agricoles entreposés sont influencés par de nombreux facteurs qui déterminent leurs propriétés de bonne ou de mauvaise conservation. Parmi ces facteurs, on peut noter l'état du produit à l'origine, le conteneur ou structure d'entreposage, la durée de l'entreposage et le type de traitement (Sinha, 1973). Contrairement aux matériaux inertes comme le sable, en cours d'entreposage, les produits agricoles subissent des transformations physiques et chimiques, et c'est pourquoi ils doivent être traités avec soin.

L'état dans lequel se trouve le produit à l'origine est probablement le plus important facteur de conservation. Par exemple, la teneur en eau et la température sont des facteurs essentiels de la conservation et, si on n'en tient pas compte, ils peuvent causer la détérioration et l'échauffement spontané des produits entreposés.

TENEUR EN EAU

En cours d'entreposage, l'eau qui se trouve à l'intérieur du produit atteint un équilibre avec l'air qui se trouve dans et entre les particules du produit, ce qui peut produire un certain degré d'humidité relative et cette humidité risque de favoriser la croissance et le développement d'organismes nuisibles. Quant aux graines entreposées, la limite inférieure pour la croissance des moisissures est proche de la limite supérieure de la teneur en eau des graines sèches soit la catégorie régulière.

Le tableau 1 montre la teneur en eau maximale permise par la *Loi sur les grains du Canada* pour les céréales, les légumes secs et les graines oléagineuses qu'il faut ne pas dépasser pour que ces produits soient vendus dans la catégorie régulière. Les teneurs sont soumises à des évaluations périodiques. Dans le cas où la teneur en eau dépasse la valeur permise (tableau 1) on impose une pénalité dont le montant augmente avec l'excédent de teneur en eau au-dessus du niveau accepté. Parce que les grains qui ont cette teneur en eau peuvent être vendus sans pénalité, on admet souvent que son niveau correspond à de bonnes conditions de conservation (Moysey et Norum, 1975). En pratique cependant, on préfère s'en tenir à un ou deux points de pourcentage au-dessous de ceux qui figurent au tableau 1, afin de ménager une marge de sécurité, car certaines graines peuvent avoir une plus forte teneur en eau ou être en moins bon état que d'autres; il peut aussi exister des poches de mauvaises herbes ou autres débris; il faut enfin tenir compte des effets des variations de température et d'autres facteurs tels qu'une température de séchage élevée (voir Partie II).

Tableau 1 Niveaux maximaux de teneur en eau* pour des graines sèches

Orge	14,8
Canola/colza	10,0
Maïs	15,5
Sarrasin domestique	16,0
Graine de moutarde domestique	10,5
Féveroles	16,0
Lin	10,0 **
Lentilles	14,0
Avoine	14,0
Pois	16,0
Seigle	14,0
Carthame	9,6
Soja	14,0
Tournesol	9,6
Blé	14,5

* En pourcentage de matières humides (Commission canadienne des grains, 1987)
** À partir du 1er août, 1988

HUMIDITÉ RELATIVE

Pour se développer, les organismes biologiques qui causent des détériorations ont besoin de différents degrés d'humidité relative. Les bactéries, par exemple, se multiplient généralement au-dessus de 90 % d'humidité relative, tandis que les moisissures demandent un niveau supérieur à 70 % et les acariens, 60 %. Les limites inférieures d'humidité relative pour le développement des insectes sont de 30 et 50 %. Mais il ne suffit pas de spécifier les limites d'humidité relatives, car cela équivaudrait à une simplification excessive des limites physiques à respecter pour éviter la détérioration des produits agricoles. On ne peut considérer l'humidité relative et la teneur en eau sans tenir compte également de la température. Par exemple, si la température d'un échantillon d'air ayant une teneur d'humidité relative de 50 % est élevée de cinq degrés soit de 25 à 30 °C, son humidité relative baissera à 38 %. Par contre, si la température de l'échantillon décroît de 5 °C en passant de 25 à 20 °C, dans ce cas, l'humidité relative passe de 50 à 69 %. Les effets et interactions de la température, de l'humidité relative et de la teneur en eau sur les produits entreposés et sur les organismes associés sont complexes. Mackay (1967) donne une explication concise de la théorie de l'humidité dans les produits entreposés.

TEMPÉRATURE

Voici les points importants à retenir en ce qui touche la température :

- si les grains sont récoltés et ensilés au cours d'une journée de forte chaleur, une température élevée se maintient dans la masse des grains en vrac pendant de nombreux mois, en raison des propriétés d'isolation des grains;

- cette forte température jointe à l'humidité influence les activités enzymatiques et biologiques, et par conséquent le degré de détérioration;

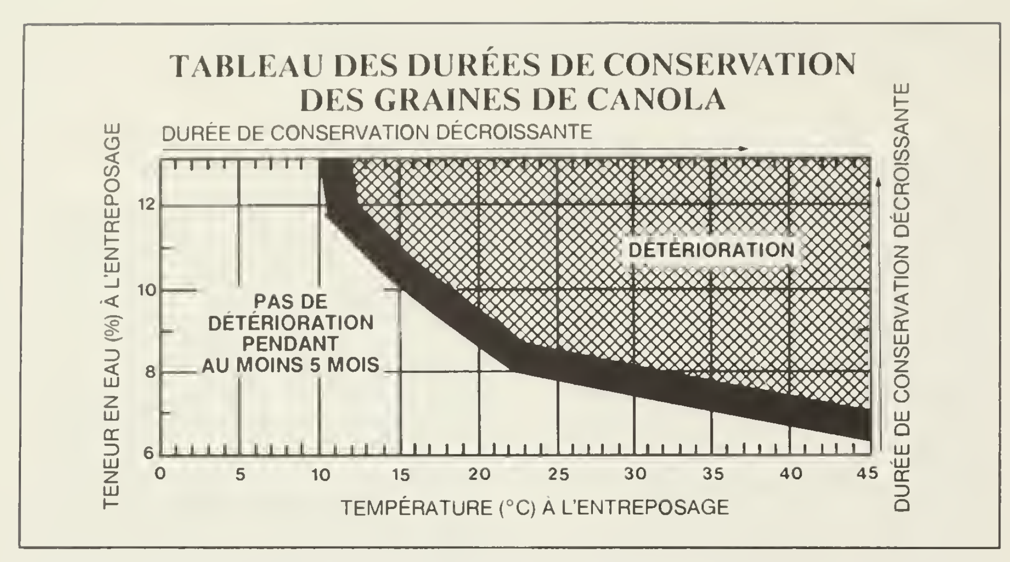


Figure 1 Tableau des durées de conservation du canola/colza en fonction de la teneur en eau et de la température des graines à l'entreposage.

- des différences de température dans la masse des denrées entreposées favorisent le développement des moisissures; ces différences sont provoquées par un déplacement d'humidité causé par la descente d'un air froid et dense suivie de la remontée d'un air plus chaud ce qui entraîne l'adsorption de l'humidité dans les couches supérieures.

RÈGLES D'ENTREPOSAGE EN VUE D'UNE BONNE CONSERVATION

Pour les grains ainsi que les graines oléagineuses, la teneur en eau et la température sont des facteurs déterminants de la durée de conservation. Le tableau de la figure 1 permet de prévoir les conditions de conservation de l'huile de canola ou de colza pendant 5 mois suivant les variations de température et de teneur en eau. Si ces deux facteurs tombent dans la zone de détérioration du tableau, il est nécessaire de prendre les mesures qui permettront de réduire l'un des facteurs ou les deux. Pour réduire la teneur en eau, on peut retarder l'entrée en action de la moissonneuse — batteuse afin de permettre à la récolte de continuer de sécher en endain, ou encore on peut faire sécher artificiellement les graines; pour abaisser la température des graines, on peut également aérer le contenu du silo. Des règles d'entreposage ont été mises au point pour prévoir la conservation à long terme d'autres denrées (Wallace et coll., 1983).

RESPIRATION ET PRODUCTION DE CHALEUR

La respiration se produit dans toutes les cellules vivantes; en présence d'oxygène (respiration aérobie), il se produit essentiellement une décomposition des hydrates de carbone, des graisses ou des protéines en gaz carbonique, en eau et en énergie. Les cellules utilisent l'énergie libérée en cours de respiration pour alimenter les processus métaboliques et cette énergie est libérée sous forme de chaleur.

En cours d'entreposage, les graines sèches et mûres sont surtout en phase de dormance et leur respiration est extrêmement faible. Cependant, des graines fraîchement récoltées et pas encore mûres ou des graines ayant une forte teneur en eau ont une respiration beaucoup plus élevée, car elles sont encore métaboliquement actives; les moisissures qui sont à leur surface et à l'intérieur de ces graines respirent activement. La respiration des graines et des moisissures qui leur sont associées entraîne donc une production de chaleur qui se traduit par une augmentation de température des grains.

Chapitre 2 Échauffement spontané

Quand un matériau augmente sa température en générant de la chaleur sans en retirer de l'environnement, c'est ce qu'on appelle de l'échauffement spontané, ou auto-échauffement, ou plus simplement, échauffement. L'augmentation de température se produit en deux phases; la première, qui va jusqu'à environ 55 °C, mais quelquefois jusqu'à 75 °C, est de nature biologique, tandis que la deuxième commence à 75 °C et peut qui monter jusqu'à au moins 150 °C est de nature chimique. L'échauffement biologique est provoqué par l'activité des cellules hôtes, des moisissures, des bactéries, des insectes et des acariens. La chaleur chimique est causée par l'oxydation. Quant à la réaction chimique, elle peut porter la température jusqu'au point d'inflammation, selon la nature de la denrée et les conditions d'entreposage (fig. 2). Pour plus de renseignements sur l'évaluation des risques concernant les matériaux sujets à l'auto-échauffement voir les travaux de Beever et Thorne (1982). Sur la théorie de l'inflammation thermique, voir les travaux de Bowes (1984).

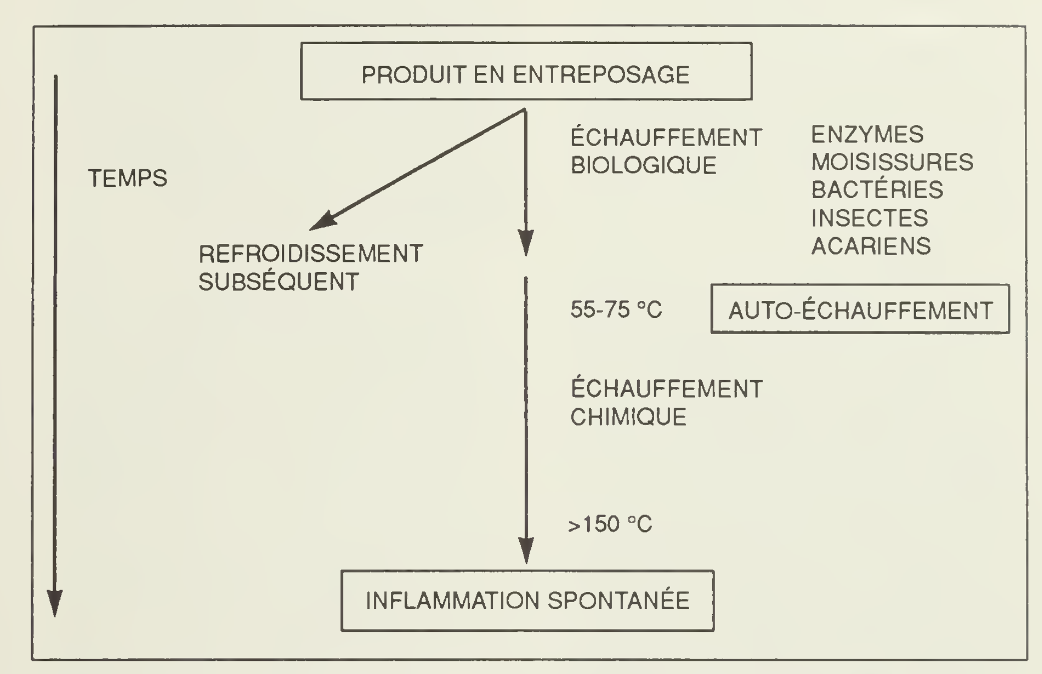


Figure 2 Schéma montrant la progression de l'auto-échauffement dans les produits entreposés.

Les matériaux entreposés varient extrêmement dans leur tendance à l'auto-échauffement (tableau 2). Cette tendance est forte pour les

Tableau 2 Matières entreposées et leurs tendances à l'auto-échauffement*

Tendance à l'échauffement				
Élevée	Modérée	Faible	Très faible	Possible
Farine de luzerne	Grains de brasserie	Graines de coton	Grains (divers)	Sacs de toile
Farine de maïs pour bétail	Coques de graines de cacao		Cuirs	Sciures de bois
Farine de poisson	Nourriture pour bétail (variée)		Jutes	
Déchets de poisson	Foin		Graines de lin	
Farine d'abrasin	Engrais		Arachides décortiquées	
	Déchets de laine		Oeufs en poudre	
			Lait en poudre	
			Sisal	

*National Fire Protection Association, 1949. Voir la liste détaillée des denrées au tableau 14.

aliments à base de farine de maïs et pour la farine de poisson, tandis qu'elle est relativement faible pour un certain nombre de grains et les arachides écalées (National Fire Protection Association, 1949). D'une façon générale, les produits traités ont une plus forte tendance à s'échauffer que les grains entiers. Le risque de détérioration et l'auto-échauffement est décrit à la Partie 2 du manuel.

ÉCHAUFFEMENT CHIMIQUE

Quand la chaleur biologique excède 75 °C, un processus purement chimique peut se développer; la température des matériaux peut alors s'élever jusqu'au point d'inflammation. Ce processus est une oxydation chimique qui libère de la chaleur. L'oxygène qui est nécessaire à cette oxydation peut se trouver sous forme libre dans l'air ou peut être libéré dans des réactions chimiques. Après l'échauffement microbien, l'oxydation chimique continue à un rythme encore plus rapide en raison du pré-échauffement biologique.

AUTO-INFLAMMATION

L'auto-échauffement d'une denrée entreposée, qui porte cette dernière à température d'inflammation, s'appelle inflammation spontanée ou auto-inflammation. On emploie quelquefois l'expression combustion spontanée, mais cette expression n'est pas recommandée. L'auto-inflammation dépend de divers facteurs chimiques et physiques (American Insurance Association, 1983; Bowen, 1982).

Trois conditions générales jouent un rôle dans l'auto-inflammation :

- la quantité de chaleur générée par la matière combustible.
- la quantité d'oxygène disponible.
- la quantité de chaleur qui s'échappe vers l'extérieur.

Un certain nombre d'huiles et de graisses végétales subissent au contact de l'air à température normale une oxydation suffisante pour s'enflammer spontanément : par exemple, l'huile de lin, l'huile de soja et l'huile de poisson. Cette réaction est favorisée lorsqu'une surface relativement étendue du produit se trouve exposée à l'oxygène de l'air, lorsqu'un produit de nature fibreuse, comme un vêtement ou un sac, se trouve imprégné d'huile ou de graisse. Il faut que l'air soit en quantité suffisante pour permettre l'oxydation, mais pas pour dissiper la chaleur.

Certains produits végétaux sont susceptibles de s'enflammer spontanément, en raison de leur contenu en huile oxydable (par exemple la farine de maïs et le son de riz); par contre, d'autres produits comme le chanvre, le jute et le sisal ne semblent s'enflammer spontanément que lorsqu'ils sont imprégnés d'une huile oxydable, bien qu'ils risquent également de s'enflammer lorsqu'ils sont imprégnés d'eau.

La teneur en eau est un facteur qui intervient dans l'auto-inflammation. Une faible teneur en eau peut augmenter les risques d'oxydation et de génération de chaleur dans de nombreux matériaux, tandis que cette teneur en eau peut également réduire le risque d'inflammation en contribuant à dissiper la chaleur générée. Toutefois, une forte teneur en eau peut également contribuer à l'échauffement biologique (American Insurance Association, 1983).

DÉTÉRIORATION ET ÉCHAUFFEMENT BIOLOGIQUES

Enzymes

Les enzymes sont des protéines spécialisées de la matière vivante qui catalysent ou accélèrent les réactions chimiques. Au cours des processus de la croissance et de la maturation dans les champs, les produits végétaux sont soumis à de nombreuses réactions chimiques qui sont catalysées par les enzymes. Si on ensile des graines fraîchement récoltées mais pas encore mûres, ces graines peuvent présenter une forte activité enzymatique entraînant une respiration importante et produisant de la chaleur. Des graines mêlées à des mauvaises herbes et des débris et ayant une forte teneur en eau peuvent également avoir une forte activité enzymatique. Au cours de cette première période d'entreposage, il est essentiel de surveiller attentivement les denrées.

Moisissures

Les produits entreposés fournissent à la fois une alimentation et un environnement favorables à de nombreux organismes et micro-organismes y compris les moisissures (champignons). Parmi celles-ci, certaines moisissures d'entreposage ou d'après-récolte (Christensen et Kaufmann, 1969) représentent la cause la plus importante de détérioration des grains et de leurs sous-produits.

Les moisissures d'entreposage existent sous forme de spores dans le sol et les débris en cours de décomposition, sur le matériel qui sert à la récolte et à l'intérieur des structures d'entreposage. Elles sont ramassées par les moissonneuses-batteuses et dispersées parmi les grains. Les diverses variétés de champignons nuisibles ont besoin, pour leur croissance et leur développement, d'un degré différent d'humidité relative et de température. Certaines espèces comme l'*Aspergillus amstelodami* (moisissure de couleur jaune vert que l'on trouve souvent sur les pots de confiture faites à la maison) poussent dans des conditions de faible humidité; elles peuvent influencer la germination des graines et produire de l'eau pendant leur croissance, ce qui favorise également la croissance d'autres moisissures nuisibles. Parmi celles-ci : l'*Aspergillus candidus* (dont les colonies sont blanches) et les espèces de *Penicillium* (vertes ou bleu-vert) qui gênent la germination des graines et sont fréquemment associées à des points chauds dans les silos de grains. Les points chauds sont des zones à l'intérieur d'une masse de grains en vrac, qui sont à une température plus élevée que celle des grains environnants.

Le développement de points chauds provoqués artificiellement a été étudié dans du blé en vrac par Sinha et Wallace (1965).

L'échauffement avait été provoqué par une espèce de *Penicillium* se développant dans une poche de grain entre –5 et +8 °C, avec un taux d'humidité compris entre 18,5 et 21,8 %. Le point chaud avait atteint un maximum de 64 °C et s'était refroidi en 2 semaines.

Les moisissures d'avant-récolte qui poussent sur des plantes en croissance peuvent se développer sur les grains entreposés. Certaines peuvent produire des toxines dangereuses sur des grains en croissance dans les champs. Pour plus de détails sur les moisissures nuisibles d'avant-récolte et d'après-récolte, voir les travaux de Christensen et Sauer (1982).

Bactéries

Bien que les bactéries soient plus nombreuses que les moisissures à la surface du grain et dans la farine, en général, elles ne jouent pas un rôle important pendant l'entreposage de ces denrées au Canada, parce que, le plus souvent, les récoltes sont sèches au moment où on les moissonne et/ou on les ensile, et que ces espèces bactériennes ont besoin pour leur croissance d'une humidité relative élevée (de 90 à 95 %). Lorsque la teneur en eau est trop faible pour leur développement, les bactéries diminuent en nombre pendant l'entreposage. Leur nombre diminue également en cours de séchage artificiel du grain. Mais quand la teneur en eau est suffisante, leur croissance contribue à l'échauffement et à la production d'odeurs aigres et putrides (Semeniuk, 1954). On peut trouver une revue complète des bactéries associées à l'entreposage des grains dans Wallace (1973).

Insectes

Plus de 60 espèces d'insectes peuvent se trouver dans les grains et les produits dérivés entreposés au Canada (Sinha et Watters, 1985). Dans des chargements de grains secs à 15 % ou moins de teneur en eau, l'activité métabolique des insectes peut amener les points à une température de 42 °C (Cotton et Wilbur, 1982). Les points chauds provoqués par les insectes se retrouvent le plus fréquemment dans le sud de l'Alberta (Canada), là où le grain est souvent ensilé à une température ambiante de 30 °C. La température ambiante est la température de l'atmosphère environnante. Une autre conséquence de cette activité métabolique localisée des insectes est une augmentation de la teneur en eau du produit, qui dépasse 15 % à proximité du point chaud, ce qui permet aux moisissures nuisibles de se développer et d'entraîner des températures allant jusqu'à 62 °C.

Plusieurs des insectes qui infestent le grain entreposé dans les fermes sont destructifs : cucujides roux, tribolium de la farine, microgramme silum, cucujide dentelé des grains, calandre des grains, ptine velue et pyrale de la farine (Loschiavo, 1984).

Dans les provinces des Prairies, un grand nombre des insectes qui infestent les produits entreposés sont capables de survivre à des températures inférieures à 0 °C (de –5 à –10 °C pour le cucujide roux) mais ne peuvent se reproduire en dessous de 17 °C. Cependant lorsque la température du grain demeure au-dessus de 17 °C pendant des périodes prolongées, ainsi qu'il se produit au centre de chargement de grains non aérés, les insectes peuvent provoquer des dommages étendus qui peuvent encore s'aggraver dans des grains à haute teneur en eau.

Acariens

Les acariens sont des animalcules fragiles, difficiles à voir. Leur présence donne au grain une odeur fortement menthée qui peut même, en cas d'infestation prononcée, rendre le produit inacceptable pour les animaux. Environ huit sortes d'acariens se retrouvent couramment dans le grain entreposé au Canada et ils sont tous capables de résister à des températures hivernales rigoureuses. Les acariens se nourrissent de grains brisés, de graines de mauvaises herbes et des moisissures présentes dans le grain, et ils prospèrent dans le grain humide. Les acariens disséminent des spores de moisissures à la surface et à l'intérieur de leurs corps, et par l'intermédiaire de leur activité métabolique. Comme les insectes, ils favorisent le développement des moisissures nuisibles (Sinha et Wallace, 1973).

Échauffement biologique extrême

L'échauffement provoqué par les moisissures dans le grain, les granulés, les aliments pour le bétail et le foin entreposés peut atteindre une température de 55 °C et rester à ce niveau pendant des semaines. Puis, cet échauffement peut disparaître progressivement ou passer au stade suivant où entrent en action les moisissures thermophiles. Celles-ci peuvent porter la température à 60 °C et être remplacées par des bactéries et des actinomycètes thermophiles qui l'amènent à 75 °C, la température maximale atteinte par l'activité microbiologique (Christensen et Sauer, 1982).

Chapitre 3 Les effets des moisissures

La croissance et le développement des moisissures nuisibles entraînent une détérioration des produits entreposés en provoquant une altération de leur qualité, des agglomérats de produits, des dommages causés par la chaleur ainsi que la production de toxines et d'allergènes. Le tableau 3 donne un résumé des effets principaux et des conséquences de l'activité des moisissures sur les produits entreposés.

ALTÉRATION DE LA QUALITÉ

À la surface des grains, la croissance des moisissures nuisibles crée une apparence terne au lieu de l'apparence brillante observée chez les grains normaux. Cette apparence terne est quelquefois considérée comme un facteur de moindre qualité. La présence de champignons nuisibles sur les grains est également souvent associée à des odeurs de moisi qui affectent la qualité du produit (Commission des grains du Canada, 1987; United States Department of Agriculture, 1972).

Les champignons nuisibles réduisent également le pouvoir de germination des grains et changent leur coloration en totalité ou en partie seulement, y compris le germe. Dans des conditions d'humidité convenable, les champignons nuisibles envahissent

Tableau 3 Effets et conséquences des moisissures sur les produits entreposés

Effets		Conséquences
1. Baisse de qualité	- aspect terne	
	- odeur de moisi	- déclassement possible
	- moisissures visibles	
	- réduction de la faculté de germination	- rejet de la catégorie semence
	- grain abîmé, décoloration	- déclassement
	- augmentation des acides gras libres	- rejet de l'industrie alimentaire
2. Agglomération du produit	- encrassement des tuyaux, des augets	- interruption des opérations
	- adhérence des produits aux parois du silo	- inégalités de pression; effondrement partiel de la cellule
	- formation de ponts dans le silo	- espace d'air dangereux
	- agglomération, fusion du contenu du silo	- frais de nettoyage, installations inutilisables
3. Échauffement du produit	- produit brûlé en cours d'entreposage	- produit et installation endommagés
		- déclassement possible, rejet, coûts supplémentaires
		- possiblilité d'incendie, d'explosions
4. Contamination du produit par des substances dangereuses	- mycotoxines	- possibilité d'empoisonnement, refus de la nourriture
		- empoisonnement du bétail, rejet des expéditions
		- pertes de marché
		- problèmes de santé chroniques chez l'homme
	- problèmes respiration, allergiques	- problèmes de respiration chez l'homme et l'animal
		- possibilité de devoir recruter du nouveau personnel pour manutentionner les grains

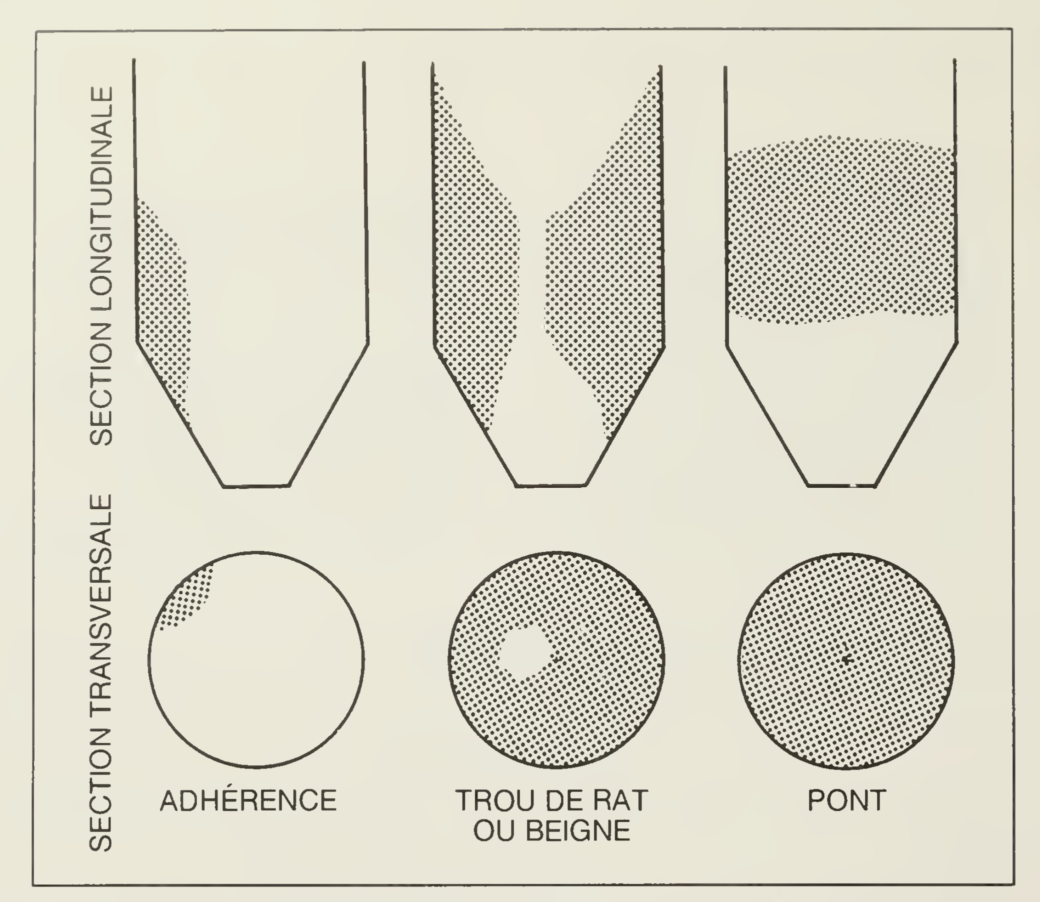


Figure 3 Types de problèmes : formation d'adhérences et de ponts provoqués par l'agglomération des matières dans les silos (d'après Northern Vibrator Manufacturing Co., Georgetown, Ont.).

les germes, sans laisser de traces visibles de moisissures, et ils affaiblissent les grains au point de les faire mourir. Certaines espèces comme l'*Aspergillus restrictus*, l'*A. candidus* et l'*A. flavus* peuvent provoquer de graves dommages et faire mourir rapidement les germes. À mesure que se poursuit l'invasion fongique des germes des grains, leurs tissus deviennent bruns, puis noirs (Christensen et Sauer, 1982). Les changements de couleur provoqués par les champignons entraînent la classification des grains dans des catégories inférieures aux États-Unis (United States Department of Agriculture, 1972) et au Canada (Commission canadienne des grains, 1987).

AGGLOMÉRATION DES GRAINS

L'activité des moisissures en cours d'entreposage des grains et des produits dérivés peut entraîner la formation de blocs et l'agglomération des grains dans des endroits particuliers, la formation de ponts à la partie supérieure ou intermédiaire des silos ou la formation d'adhérences aux parois du silo, comme le montre la figure 3.

Formation de blocs

La formation de blocs de grains à l'intérieur d'un chargement résulte de la prolifération de filaments (ou mycélium) de moisissures sur, dans et parmi les grains, qui les relient ensemble. Burrell et coll. (1980), qui ont étudié les moisissures du colza, ont observé que chaque bloc était formé d'un mycélium rayonnant à partir d'un nucleus, soit un corps étranger soit un grain très endommagé. Les blocs se forment généralement quand certains endroits particuliers du chargement sont très humides, ce qui favorise le développement des moisissures. Des blocs de grande dimension peuvent empêcher les grains de passer librement à travers les augets et les tuyauteries, ce qui peut provoquer une interruption des opérations. De tels blocs peuvent perturber l'écoulement du produit lorsqu'on vide le silo. Un écoulement excentré du chargement peut présenter un risque pour la structure du silo. Parfois, la croissance des moisissures entraîne la formation d'importantes colonnes de matières agglomérées, par exemple à la partie inférieure des conduites (Meronuck, 1984), ou même la fusion du contenu entier d'un silo. De tels problèmes peuvent rendre inutilisables les installations pour un certain temps et entraîner des frais supplémentaires de dégagement.

Formation de ponts à la partie supérieure

Si on laisse reposer des chargements de grains pendant des mois, il peut se développer à la partie supérieure une croûte de plusieurs centimètres d'épaisseur formée de grains pourris, de textures de moisissures qui se logent entre les grains et de grains germés. La formation de ces croûtes est provoquée par des variations de température et d'humidité qui se produisent à l'intérieur du silo lorsqu'il se produit des courants de convection (Université du Kentucky 1984).

Les ponts de grains qui se forment au sommet des chargements représentent un grave danger pour les personnes qui travaillent à la manutention, car il y a des espaces vides sous la croûte, dans les silos partiellement déchargés. En cours de déchargement, un travailleur risque de passer à travers la surface du pont, et de tomber dans un véritable piège. Et même lorsqu'on ne décharge pas le silo, quelqu'un peut tomber dans un large espace vide qui se serait formé lors d'une précédente opération de déchargement. Ce travailleur risque alors, soit de suffoquer dans le grain, soit d'être forcé de respirer des gaz toxiques et des spores microbiennes, jusqu'à ce qu'il soit rescapé (voir chapitre 7 : Sécurité).

La formation de ponts peut également se produire dans des silos fermés lorsque les conditions sont favorables à la croissance microbienne (Nichols et Lever, 1966). À la surface, les grains se collent ensemble et adhèrent aux parois du silo, entraînant la

formation d'un cône vide au-dessus de l'auget d'extraction. Des blocs de grains agglomérés peuvent se détacher, tomber dans le cône vide, et se mélanger avec le produit propre en cours d'extraction. Des blocs peuvent également se multiplier et rendre l'extraction saccadée. Si le grain forme un pont à travers le silo, l'écoulement risque même de cesser et le silo doit être ouvert.

Formation de ponts à la partie intermédiaire

En 1979, lorsque la Red River a inondé des silos à proximité de Winnipeg, on a observé la formation de plusieurs ponts à l'intérieur des chargements de grains, formés de grains germés, moisis et agglomérés et de mycélium de moisissures. Après le retrait des eaux, le contenu des silos a été examiné. On a constaté alors que les ponts s'étaient formés juste au-dessus du niveau le plus élevé que les eaux avaient atteint. Au-dessus des ponts, la plupart des grains pouvaient être sauvés si le fermier réussissait à les retirer avant que les odeurs de putréfaction, provenant du grain mouillé sous le pont, ne parviennent à la hauteur du grain situé au-dessus (Mills et Abramson, 1981).

Adhérences

Dans les silos, le grain mouillé peut adhérer aux parois et former avec le temps, de part en part de la cellule, une couronne circulaire avec un trou au centre (trou de rat ou adhérence en forme de beigne). Vu d'en haut, ces adhérences ont souvent la forme d'un beigne et on peut voir les grains qui descendent par le trou central. Il arrive fréquemment que les responsables des silos ignorent l'existence d'adhérences à l'intérieur du silo jusqu'à ce qu'un échauffement spontané ou une infestation par des insectes se produise, ou bien encore ils s'en aperçoivent lorsque le silo est totalement vidé.

La formation de ponts, d'adhérences de matières aux parois et le colmatage de certains points d'entrée dans les augets peuvent entraîner des inégalités de pression et souvent même des dommages sérieux au silo. Les parois peuvent se déformer et s'effondrer à cause de ces inégalités qui se développent au cours de l'écoulement des grains à l'intérieur du silo. La plupart des silos sont bâtis de façon à être vidés par le centre. Un vidage excentré entraîne des charges inégales et (croit-on) augmentées, au moins, près du canal de la paroi. Des adhérences de grains peuvent entraîner des gauchissements ou des bosselures (Jenike, 1967). Ravenet (1978) décrit le phénomène de l'effondrement des silos causé par des pressions internes. Ces ponts ou adhérences peuvent rester en place pendant des mois et fournir un abri favorable aux insectes nuisibles, qui peuvent se disséminer à partir du pont pour infester le reste du grain ou des produits traités.

DOMMAGES PROVOQUÉS PAR LA CHALEUR

La respiration des champignons nuisibles, comme les espèces *Aspergillus* (*A. candidus* de couleur blanche ou crème et *A. flavus* de couleur jaune verdâtre) peut augmenter la température des produits entreposés et la porter à 55 °C. Le développement de ces moisissures se produit fréquemment dans des poches d'humidité excessive qui se forment à l'intérieur des chargements. Des déplacements d'humidité, des mauvaises herbes à forte teneur en eau, des débris de plantes ou des rafales de pluie ou de la neige fondue peuvent être à l'origine de la formation de ces poches d'humidité.

L'élévation de température entraîne un brunissement ou un noircissement interne des grains, dont la qualité se trouve ainsi réduite et dont la germination est diminuée ou inexistante. Les effets de l'échauffement empirent progressivement, si un échauffement chimique succède à l'échauffement initial causé par les moisissures. Si un échantillon contient des grains bruns ou noirs ayant souffert de la chaleur et/ou d'une odeur de brûlé, il sera classé dans une catégorie inférieure, aux États-Unis comme au Canada. Il suffit seulement de 2 % de grains bruns ayant souffert de la chaleur dans un échantillon de canola ou de colza pour le faire passer de la catégorie n° 1 Canada à la catégorie n° 3 Canada, avec les pertes financières que cela comporte. Si l'on trouve plus de 2 % de grains ayant souffert de la chaleur, le grain sera classé comme colza, Échantillon Canada, grains chauffés (Commission canadienne des grains, 1987). Pour d'autres types de grains, les critères sont semblables. Si les grains ayant souffert de la chaleur se retrouvent en grande quantité, cela peut entraîner, tout comme l'huile des oléagineux surchauffés, des problèmes de traitement; on est alors obligé de recourir à des processus de décoloration, ce qui augmente les coûts.

Les grains dont l'extérieur est noirci et qui ont souffert de la chaleur sont classés comme brûlés en entreposage ou brûlés par le feu, selon la gravité de leur échauffement. L'extérieur des graines brûlées est souvent d'un noir luisant, avec d'importantes cavités internes, tandis que les graines brûlées en entreposage, bien que souvent noires à l'extérieur, sont de brun à brun foncé en coupe et sans cavités importantes. De plus, les graines brûlées sont souvent soudées ensemble (Christensen et Kaufmann, 1977). On a observé le même phénomène dans notre laboratoire de Winnipeg avec des graines de canola ou de colza, des grains de blé ou d'orge de brasserie incendiés ou brûlés en entreposage. Mills et Chong (1977) ont étudié la structure fine et la distribution des minéraux dans les graines de canola ou de colza saines ou endommagées par la chaleur.

Les dommages causés par l'échauffement peuvent également provenir d'un séchage artificiel inapproprié. Des grains qui sont endommagés par une chaleur excessive en cours de séchage ont une viabilité réduite, sont d'une couleur plus foncée et peuvent même avoir des péricarpes boursouflés. Dans des cas d'échauffement extrême, les grains peuvent même exploser ou éclater partiellement (Freeman, 1980).

TOXINES

Lorsqu'il existe des conditions propices d'humidité et de température, les moisissures nuisibles produisent sur les grains entreposés des substances toxiques appelées mycotoxines. Et quand des animaux prédisposés mangent les grains contaminés par les mycotoxines, ils peuvent contracter des maladies appelées mycotoxicoses. Les effets des mycotoxines sur les animaux varient selon l'espèce, l'âge ainsi que le type et la quantité de toxine qui se trouve dans la nourriture. Parmi les effets de ces maladies, on note l'impossibilité de prendre du poids, la formation de tumeurs, une perte de productivité, des anomalies foetales et la mort subite. Dans l'Ouest canadien, on a établi un lien entre des problèmes de santé du bétail et l'ochratoxine A, produite par la moisissure d'entreposage *Penicillium verrucosum*, une variété du *cyclopium*, et la stérigmatocystine, produite par l'*Aspergillus versicolor*, on a trouvé ces mycotoxines dans des grains entreposés, accidentellement mouillés ou humides (Abramson et coll., 1983). Aux États-Unis, on a trouvé dans la nourriture pour volaille des aflatoxines produites par l'*Aspergillus flavus (Hamilton, 1985)*. On a également trouvé dans de la poussière de grain des mycotoxines causant des problèmes de santé à des travailleurs qui manipulaient du maïs contaminé par des aflatoxines en Georgie, U.S.A., (Burg et coll., 1982). Récemment, on a découvert, dans de la poussière de grain, de l'aflatoxine qui se trouvait dans des fragments de mycélium fongique ainsi que d'autres mycotoxines dans les spores fongiques (Palmgren et Lee, 1986). Les travaux de Mannon et Johnson (1985) donnent un panorama complet des risques dérivant des mycotoxines, dans le monde entier. Pour un résumé de l'information disponible sur les mycotoxines et leurs effets sur l'homme et le bétail au Canada, consulter les travaux de Scott et coll. (1985).

Lorsque du grain et des produits dérivés du grain s'échauffent et/ou brûlent, d'autres substances toxiques peuvent être produites, y compris des substances cancérigènes. À cause de ce risque et en raison de l'effet de ces substances toxiques sur les animaux lorsque des produits endommagés par la chaleur sont intégrés à leur nourriture, il est nécessaire de procéder à une inspection rigoureuse.

SUBSTANCES ALLERGÈNES

Les champignons nuisibles, que l'on retrouve sur et dans les grains entreposés, causent des allergies à la fois chez l'homme et l'animal. Deux types d'allergies d'origine fongique ont été décrites chez l'homme : l'asthme bronchique et le «poumon du fermier». Ces problèmes sont causés par des réactions allergiques dans le système respiratoire, qui est stimulé par des allergènes provenant surtout des spores fongiques. En 1968, après des moissons effectuées dans des conditions inhabituelles, on a récolté et entreposé plus de 70 % du grain de la province de Saskatchewan qui étaient, dès le début, à l'état ferme ou humide. Plus tard, 20 des 3200 fermiers ou responsables d'élévateurs, qui avaient travaillé avec des grains humides, échauffés ou endommagés, ont présenté un syndrome aigu du poumon du fermier (Dennis, 1973). Pour avoir un bilan sur la nature de la poussière de grain, l'exposition du travailleur à la poussière et les maladies qui y sont associées, consulter les travaux de Manfreda et Warren (1984).

On peut éviter la détérioration et l'échauffement des denrées entreposées si l'on sait quoi faire en matière de stockage des denrées, si on fait une planification préliminaire et si on applique des techniques de traitement appropriées. On trouvera au tableau 4 les étapes recommandées pour éviter les problèmes de conservation pendant l'entreposage.

STRUCTURES D'ENTREPOSAGE

Il faut obtenir tout d'abord l'avis d'un ingénieur agréé sur le type de structure d'entreposage la plus adéquate selon la région et l'usage qu'on veut en faire. Une fois choisies, les structures doivent être installées sur un emplacement bien drainé et sur des fondations bien conçues pour éviter l'infiltration des eaux de drainage et les fissures au plancher. Les silos verticaux qui contiennent de grandes quantités de nourriture combustible pour les animaux doivent être installés dans des zones complètement libres, à bonne distance des bâtiments et des matériaux combustibles de toute sorte (fig. 4) (Fire Protection Association, 1968).

À intervalles réguliers, il faut vider complètement les silos et en examiner l'intérieur pour détecter les matériaux adhérents («adhérences») collés sur les parois. Il faut également nettoyer avec soins les silos vides, puis vaporiser sur le plancher et les parois un insecticide approprié pour détruire tous les insectes qui pourraient s'y trouver et qui risqueraient de réinfester le nouveau grain. On doit enlever les vieux grains ou les débris qui pourraient se trouver près des portes du silo, ou sous les planchers d'aération ou de séchage. Il faut enlever également toute la végétation qui entoure le silo et qui abrite des insectes nuisibles.

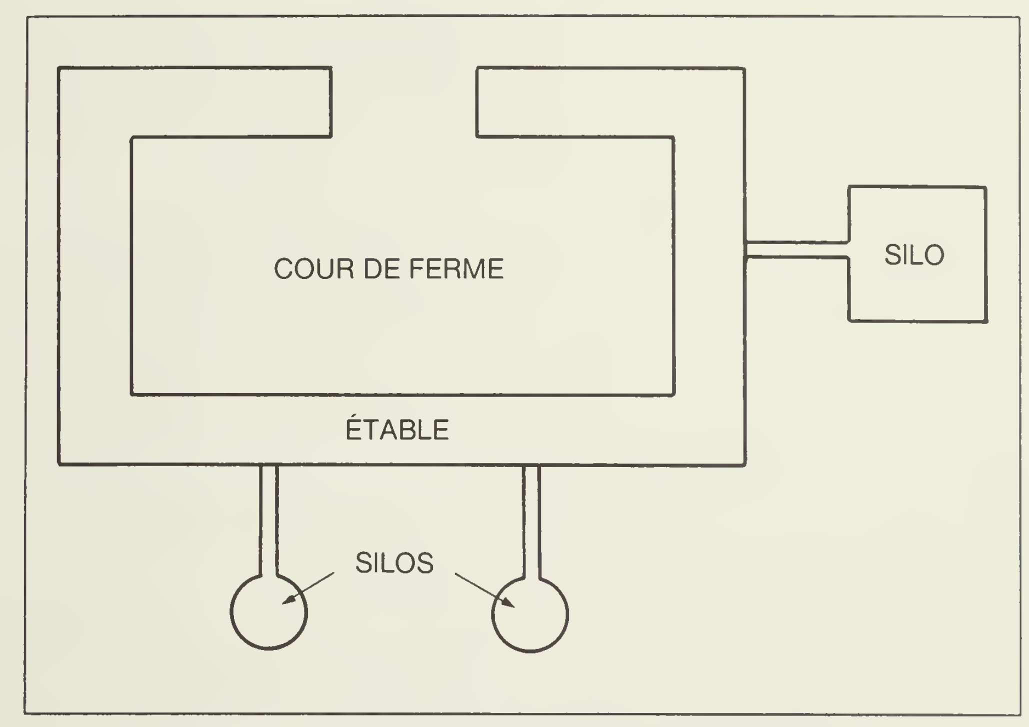


Figure 4   Emplacement des silos de ferme par rapport aux constructions et autres matériaux combustibles (d'après la Fire Protection Association, 1968).

On peut maintenant trouver des silos (par exemple, le Carter-Day All Flow®, Minn.) qui sont pourvus de parois membraneuses gonflables et qui sont conçus de façon à s'ajuster exactement contre les parois et le plancher et qui empêchent la formation d'adhérences, de «trous de rats» et de ponts. Ce type de silo est muni de détecteurs qui peuvent déterminer le moment où il faut décharger. La membrane alors se gonfle automatiquement, en modifiant l'angle d'appui du produit et en le poussant vers l'ouverture de déchargement.

On doit maintenir les structures en bon état de fonctionnement et d'étanchéité pour éviter que les rafales de pluie ou la neige, en fondant, n'entretiennent l'humidité qui favorise le développement des moisissures. Il faut réparer les fissures dans les murs en béton et sur les planchers, et sceller les interstices à l'interface du mur en métal et de la base en béton pour éviter les moisissures et diminuer le nombre d'abris pour les insectes.

TRAITEMENT AVANT L'ENTREPOSAGE

Pendant que la récolte est encore dans les champs, de bonnes décisions peuvent prévenir d'éventuels problèmes d'entreposage : par exemple, un bon séchage à l'air des petits grains dans les champs pour garantir la teneur en eau appropriée pendant l'ensilage; déterminer la teneur en eau des grains et leur température, en prenant des échantillons à la sortie de la moissonneuse–batteuse pour évaluer, au moyen de tables, les possibilités d'entreposage (Kreyger, 1972; Mills et Sinha, 1980; Wallace et coll., 1983). On peut aussi moissonner les parties plus humides ou plus basses du champ où se trouvent probablement des grains qui ne sont pas arrivés à maturité et qui ont une forte activité respiratoire; on les ensile ensuite dans des cellules d'observation plus petites dans la cour de ferme jusqu'à ce que les grains soient aérés et séchés.

Tableau 4 Prévention de la détérioration et de l'échauffement des produits entreposés

Récolte de grains dans les champs	- Faciliter le séchage à l'air des petits grains en andains, de façon à obtenir une teneur en eau satisfaisante. - Prévoir un ensilage spécial ou un séchage artificiel pour les grains humides et non mûrs.
Ensilage	- Demander conseil pour s'assurer que le système de silo convient à l'entreposage projeté. - S'assurer que le drainage du site est convenable. - Nettoyer l'intérieur et les abords de la cellule, de façon à éliminer tout ce qui peut favoriser la présence des insectes. - Conserver la cellule en bon état et rechercher régulièrement la présence de fuites. - Vaporiser un insecticide et faire une fumigation si nécessaire. - Refuser l'entrée de chargements de qualité douteuse. - Se renseigner sur l'origine et le sort des matières. - Obtenir au préalable des échantillons et faire des tests pour déceler l'invasion des moisissures. - Enlever les débris avant l'entreposage. - Utiliser dans la cellule un dispositif à disperser ou à remuer le grain, bien réglé, afin de répartir les matières fines de façon égale; mais savoir que certains dispositifs ne conviennent pas à une bonne distribution des matières fines. - Prélever des échantillons et déterminer leur teneur en eau durant l'entreposage. - Retourner périodiquement les produits entreposés. Il s'agit cependant d'une manutention coûteuse, qui demande beaucoup de travail et risque de briser les matières, comme le maïs. Il est préférable d'aérer.
Aération	- Connaître les principes de l'aération ainsi que les problèmes qui risquent de se produire. - Demander conseil pour le plan du plancher et la taille du ventilateur. - Enlever les débris avant l'aération. - Se servir de l'aération pour refroidir ou réchauffer les matières (Friesen et Huminicki, 1986).

(suite)

Tableau 4 Prévention de la détérioration et de l'échauffement des produits entreposés (*suite*)

Séchage	- Demander conseil sur l'équipement le plus approprié. - Nettoyer les matières avant le séchage; pour le maïs, enlever plutôt les matières fines des criblures après le séchage, car les grains brisés/matières étrangères doivent être séchés avant l'entreposage et l'utilisation par le bétail. - Enlever les accumulations de poussière et de fibres sur les parois et dans la région du brûleur. - Utiliser les déflecteurs de vent pour empêcher les matières et l'humidité présentes dans l'air de pénétrer dans le brûleur. - Rechercher les fuites dans les réservoirs et les conduites de propane. - Inspecter les fils électriques et les disjoncteurs. - Rechercher les inégalités de séchage. - Utiliser les ratios air/grain appropriés sur les dispositifs de remuage, pour éviter les fronts de séchage en stagnation. - Attention aux températures de séchage excessives. - Refroidir après le séchage. - Savoir que les humidimètres électriques peuvent indiquer une teneur en eau inférieure à celle de la sortie du séchoir.
Grains à forte teneur en eau	
Conservation chimique	- Nettoyer les matières avant le traitement. - Utiliser une concentration appropriée à la teneur en eau du grain. - Utiliser suffisamment de produits chimiques, que ce soit sur la totalité ou sur une partie du produit en vrac. - Aérer les matières pour éviter le déplacement de l'humidité. - Protéger les surfaces en béton ou en métal avec du plastique ou de la peinture résistant aux acides, quand on utilise des préparations à base d'acide propionique.
Ensilage des produits verts	- Couper à la bonne période en évitant qu'ils ne se flétrissent, vérifier le pourcentage de matières sèches et hacher court. - Remplir rapidement les silos pour permettre un bon tassement des matières en évitant l'inclusion d'air. - Utiliser le distributeur pour tasser le long des parois. - S'assurer que les portes et les parois sont bien hermétiques (déchargement par le haut).

(suite)

Tableau 4 Prévention de la détérioration et de l'échauffement des produits entreposés (*fin*)

Ensilage des produits verts (*suite*)	- Garder les panneaux du haut et du bas bien fermés pour éviter l'effet de cheminée (déchargement par le bas). - Connaître le pourcentage de teneur en eau minimal pour une bonne conservation. - Disposer un bouchon de matières vertes humides au sommet du chargement du silo (silos non étanches). - Déplacer rapidement les matières. - Décharger partiellement, immédiatement après remplissage, pour éviter la formation de ponts dans la région des augets (silos à limitation d'oxygène).
Produits transformés	- Enlever les fragments de métal constituant des foyers de points chauds. - Refroidir en petites quantités avant l'ensilage des matières moulues ou artificiellement séchées. - Faire vibrer les parois de la cellule de façon à éviter la formation de ponts. - Éviter la contamination par du liquide susceptible de s'auto-échauffer. - Éviter d'entreposer trop près des sources de chaleur comme : tuyauterie chaude, moteur, lampe électrique. - Éviter de trop sécher. - Vérifier les convoyeurs de cellules, source éventuelle de chaleur par frottement ou d'étincelles.
Formation	- Former le personnel en lui apprenant à connaître les caractéristiques d'entreposage des différentes denrées. - S'assurer que le personnel connaît les limites de teneur en eau et qu'il est au courant des déplacements d'humidité. - Insister sur l'importance des inspections régulières et d'un bon système de compte rendu.

REFUS DE CHARGER LE PRODUIT DANS L'ÉLÉVATEUR

Un responsable d'élévateur doit exercer son droit de refuser des chargements dont la qualité de conservation est douteuse ou qui sont en mauvais état afin de prévenir des problèmes ultérieurs de manipulation et d'entreposage.

Si on a le temps, avant le chargement de l'élévateur, on peut déterminer le degré d'invasion par des champignons nuisibles dans les lots de grains suspects, en triant sur une plaque des échantillons représentatifs, et en les rejetant s'ils ne sont pas conformes. Par exemple, un wagon de graines de soja qui est déjà infesté, même légèrement ou modérément par des champignons nuisibles, représente un risque d'entreposage plus élevé que des graines de soja saines. Il se peut que les moisissures ne soient pas visibles à l'oeil nu. De tels chargements entreposés dans des conditions favorables au développement des moisissures risquent de se détériorer plus rapidement et plus sérieusement que des graines en parfait état (Christensen et Kaufmann, 1972).

Le tri en plaque d'échantillons avant le chargement de l'élévateur est pratiquement impossible en pleine période d'activité; mais, dans des situations particulières, il peut se révéler utile.

DIRECTIVES D'ENTREPOSAGE

Directives générales

Il faut nettoyer le matériel moissonné afin de retirer les débris à haut risque, les grains brisés, les graines d'herbes immatures, la paille, les poussières et autres fines particules, car on peut ainsi améliorer l'efficacité des aérateurs des séchoirs de silos en augmentant le débit de l'air. Avec le maïs, il faut retirer les particules fines des cribles après séchage, parce que les grains cassés et les matières étrangères doivent être séchés avant d'être entreposés comme aliments pour le bétail. Des unités de nettoyage intégrées dans les augets à grains réguliers permettent maintenant de nettoyer le grain pendant son passage dans l'auget (Anonyme, 1982). S'il n'est pas possible de nettoyer le grain, on peut utiliser un disperseur de grain bien ajusté ou un dispositif d'agitation (Gebhart, 1983) à l'intérieur du silo pour éviter l'accumulation de fines particules et autres matières au centre du silo. On peut retirer une ou plusieurs charges, à la fin de l'entreposage, par le bas du silo, pour retirer les particules fines et ainsi former un cône inversé plutôt qu'une surface pointue, afin de mieux refroidir l'air ambiant. En Saskatchewan, on remplit souvent les silos le plus possible, de façon à laisser moins d'espace pour l'accumulation de la neige, mais dans des régions très humides comme le Manitoba, le remplissage complet des silos risque de réduire la ventilation et d'augmenter les risques de détérioration.

On doit prendre un échantillon de la récolte afin de déterminer ***l'importance*** de sa teneur en eau au moment de son chargement dans le silo. Ce sont les plus fortes teneurs en eau qui doivent être un sujet d'inquiétude. Il faut aérer les matières entreposées. Dans des silos non aérés, après remplissage, on peut transvaser les matières dans un autre silo ou dans un camion afin d'égaliser les poches

d'humidité et les différences de température. Ce transvasement est coûteux et augmente la proportion de matières étrangères, spécialement lorsqu'il s'agit de maïs, c'est pourquoi on doit le faire avec modération.

On doit inspecter régulièrement la structure d'entreposage et son contenant pour voir s'il n'y a pas de fuites par exemple, dans la couverture des silos ou dans les écoutilles des navires, ou encore de la neige dans les fissures, pour vérifier si les portes sont bien fermées et relever des traces de détérioration. Il est recommandé d'installer des échelles métalliques permanentes sur les parois des structures d'entreposage, de façon à faciliter ces inspections. On doit inspecter régulièrement les matières entreposées pour voir s'il n'y a pas de traces de détérioration et d'échauffement, particulièrement au centre de la partie supérieure; on peut encore installer des télédétecteurs de CO_2 et de température. La description des moyens de détection se trouve dans une section plus loin.

On peut prévoir le développement probable de moisissures visibles dans un chargement de grains, en cours de périodes d'entreposage, d'après la quantité de moisissures nuisibles existantes et d'après l'origine, l'état et le type de grains en question. On décide alors de la durée de conservation de tel lot particulier, ou de sa mise au rebut ou encore des mesures préventives à prendre.

Aération

L'aération consiste à forcer le passage d'air non chauffé, au moyen d'un ventilateur, à travers le grain, afin de le maintenir en bon état de conservation. L'aération peut réduire les chances de détérioration et d'échauffement, car elle réduit la température du chargement, si le grain se trouve à une température supérieure à celle de l'air ambiant; l'aération maintient une température uniforme à travers la masse du grain, ce qui réduit ou élimine le déplacement de l'humidité, élimine les points chauds, réduit la croissance des moisissures et des insectes, et chasse les odeurs d'entreposage. Dans les provinces des Prairies, l'aération se pratique à un débit de 1 à 2 (L/s)/m^3. Il existe divers systèmes d'aération. La disposition du plancher et la dimension du ventilateur sont d'une grande importance; il est nécessaire de vérifier les spécifications avec l'aide d'un ingénieur agronome reconnu. Friesen et Huminicki (1986) ont décrit les principes d'aération et les méthodes de fonctionnement des systèmes d'aération.

Il peut se produire des détériorations limitées, si le courant d'air est trop faible dans certaines régions du silo, s'il s'y trouve un excès de débris ou si l'on interrompt l'aération avant que toute la masse de grains n'ait été refroidie en automne ou réchauffée au printemps : dans les deux cas, une condensation peut se produire entre les parties plus froides et les plus chaudes de la masse des grains entreposés. Dans les cas extrêmes, si l'échauffement spontané est trop avancé, l'aération peut entraîner une auto-inflammation, mais la récolte serait perdue de toute façon.

Séchage

Le séchage du grain évite les détériorations du grain et l'échauffement qui peut en résulter. Un autre avantage du séchage des grains est de prolonger la saison de la moisson et de permettre de moissonner plus tôt en limitant les pertes sur pied (Friesen, 1981). Afin d'obtenir les meilleurs avantages d'un séchoir à grain, il est nécessaire d'établir un système bien organisé de traitement du grain. Pour sécher le grain, on dispose de plusieurs méthodes, dont chacune implique le passage de l'air à travers le grain. Voici ces méthodes :

- le *séchage à l'air chaud*, qui consiste à souffler de l'air chaud à travers le grain dans un séchoir séparé ou dans un silo.
- le *séchage à basse température*, qui emploie des propriétés de l'air atmosphérique pour sécher le grain.
- le *séchage combiné* qui consiste à souffler de l'air chaud puis à refroidir en silo et à sécher par l'air atmosphérique.
- le *séchage-aération* dans lequel le séchage à l'air chaud est suivi d'une période où l'on fait revenir doucement le grain pour le refroidir ensuite et le sécher dans un silo séparé.
- le *refroidissement en silo*, qui, à la différence du refroidissement en séchoir, consiste à transférer directement les grains chauds dans le silo afin qu'ils s'y refroidissent.

Le séchage du grain est un sujet trop complexe pour être décrit ici. Le lecteur peut se reporter aux publications de Friesen (1981), Friesen et Huminicki (1986) et Moysey (1973). L'American Society of Agricultural Engineers (1986) a publié les recommandations générales pour la conception, l'installation et l'utilisation des séchoirs, mais parfois il y a quelques différences avec les codes canadiens.

Le feu dans les séchoirs

Le feu peut se déclarer dans les séchoirs de type fermier ou commercial; il se manifeste par une brusque élévation de la température de l'air à la sortie. Le feu peut se déclarer dans des séchoirs à air chaud, parce que de la saleté et des résidus se sont accumulés dans la région du brûleur. Les graines de tournesol portent souvent du duvet qui peut se libérer en cours de processus de séchage et qui peut prendre feu s'il traverse le ventilateur et parvient au brûleur. De même, des débris de grains de maïs composés de coton et autres particules fines peuvent s'enflammer, ainsi que des graines de canola lorsqu'elles traversent un brûleur.

Voici quelques conseils destinés à réduire le risque d'incendie dans les séchoirs (Broadhurst, 1985; Friesen, 1981) :

- Vérifier si les réservoirs et les conduites de gaz propane ne comportent pas de fuite.
- Vérifier que le filage électrique est en bon état; la gaine des fils peut être craquée, desséchée ou arrachée, spécialement au niveau des connections d'équipement qui sont en mouvement constant. Par manque d'utilisation, des

disjoncteurs peuvent se détériorer au point qu'ils ne se déclenchent plus en cas de surcharge.

- Ne pas neutraliser mais réparer certaines commandes, comme les interrupteurs d'arrivée d'air qui sont prévus par le fabricant comme dispositif de sécurité.

- Nettoyer les graines avant séchage de façon à retirer les matières légères ou fines.

- Utiliser des déflecteurs afin d'empêcher le passage de matières transportées par l'air à travers le brûleur.

- Retirer les accumulations de poussières et de duvet des parois et autres parties du séchoir.

- Éviter de trop sécher les graines.

- Conserver la température de l'air de séchage dans les limites de sécurité recommandées.

- Rester sur ses gardes tant que dure le cycle de séchage.

- Pendant les journées chaudes et sèches, actionner le séchoir sur les graines de tournesol et de canola sans faire fonctionner le brûleur.

- Dès qu'un feu éclate, arrêter le ventilateur et la production de chaleur.

- Tenir prêt à être utilisé un boyau d'incendie ou un extincteur ou les deux.

Les séchoirs commerciaux sont également exposés au risque d'incendie. Pour des renseignements plus détaillés sur la détection des feux et la lutte contre les incendies dans les séchoirs commerciaux, voir plus loin.

Entreposage de grains à forte teneur en eau

On peut empêcher la croissance de moisissures sur des grains à forte teneur en eau (plus de 22 à 25 %) en limitant l'apport d'oxygène, par exemple, en utilisant des silos étanches. Une autre méthode consiste à appliquer sur les grains des produits chimiques qui empêchent le développement des moisissures.

Entreposage dans des silos étanches Lorsque du grain à forte teneur en eau (maïs) est placé dans un silo étanche, ce grain subit une fermentation; l'oxygène est consommé et la teneur en gaz carbonique est augmentée par la respiration des grains, des levures et des bactéries. La croissance des moisissures aérobies est arrêtée, mais la germination est rendue impossible et le grain ne peut plus servir qu'à l'alimentation du bétail. Lorsqu'on retire le grain du silo, la croissance des moisissures reprend, si bien que les grains exposés à l'air libre doivent être rapidement donnés au bétail, si l'on veut prévenir la croissance des moisissures. Les grains à forte teneur en eau peuvent être entreposés dans des silos métalliques à revêtement vitré qui contiennent peu d'oxygène; d'autres types de silos étanches sont pourvus d'un système de respiration destiné à empêcher que leur structure ne soit endommagée par les différences de pression et qui limitent les échanges entre les gaz à l'intérieur du silo et l'air extérieur. Bellman (1982) et Pos (1980) ont traité du choix et de l'utilisation des silos à limitation d'oxygène. On peut entreposer les grains à forte teneur en eau dans des silos étanches en ciment ou dans des réservoirs recouverts de plastique. Le maïs est généralement concassé et fortement comprimé de façon à développer rapidement des conditions anaérobies (Tuite et Foster, 1979).

Voici quelques-uns des problèmes qui peuvent survenir en cours d'entreposage de grains à forte teneur d'eau dans des silos étanches : la détérioration du maïs à proximité des parois des silos en ciment, qui se produit lorsqu'on n'a pas étendu les grains en couches horizontales uniformes et la détérioration en surface, qui survient lorsque l'on retire les grains trop lentement, ce qui permet au niveau d'oxygène d'augmenter. Dans les silos à limitation d'oxygène, il peut se former des ponts au-dessus des augets de déchargement qui sont à l'état stationnaire. Lorsqu'un auget ne dispose que d'une seule position fixe, il est recommandé de procéder à un léger déchargement aussitôt après avoir terminé le remplissage, de façon à établir un type de débit qui évite les risques de formation de ponts (Pos, 1980).

Agents de conservation Quand du grain à forte teneur en eau a été traité avec un agent de conservation reconnu et selon les recommandations, on peut le retirer du silo d'entreposage sans se soucier des détériorations. C'est l'acide propionique qui est le produit le plus souvent utilisé, soit pur, soit mélangé avec de l'acide acétique, de l'acide isobutyrique ou de la formaldéhyde, mais ces derniers produits n'augmentent pas la valeur de l'acide propionique de façon significative. D'autres produits sont encore à l'essai : l'anhydride sulfureux (SO_2) et l'ammoniac (NH_3) (Tuite et Foster, 1979). La proportion d'acide employé dépend de la température, de la durée de conservation et de la teneur en eau du grain puisque les plus fortes teneurs d'eau demandent des quantités plus fortes d'acide (tableau 5). Les grains traités à l'acide ne demandent pas de type particulier de structure d'entreposage, mais lorsqu'ils se trouvent dans des réservoirs en acier galvanisé, il peut se produire une corrosion prononcée. On peut remédier à ce problème en recouvrant les parois de peinture au caoutchouc chloré (Theakston, 1972).

Il peut se produire des problèmes de détérioration même lorsque le grain a été traité au moyen d'un agent de conservation, d'où la nécessité de faire des inspections régulières en cours d'entreposage (University of Kentucky, 1984). La croissance des moisissures libère de l'humidité qui leur permet de se disséminer dans le grain traité. Ce phénomène se produit dans les circonstances suivantes :

- Lorsqu'on a employé un dosage d'agent de conservation qui ne convient pas à la teneur en eau du grain.

- Lorsqu'on utilise une quantité insuffisante d'acide dans la masse ou à un endroit particulier du chargement.

- Lorsque des points d'humidité se développent à la suite du déplacement de l'humidité. Pour

Tableau 5 Quantités d'acide propionique nécessaires pour prévenir le développement de moisissures dans des grains à forte teneur en eau*

% de teneur en eau	Acide propionique nécessaire	
	Pourcentage ** ***	kg/tonne ** ***
18	0,3–0,6	2,5–4,9
22	0,5–0,8	4,1–6,6
26	0,6–1,0	4,9–8,3
30	0,8–1,2	6,6–9,9

* Source : University of Kentucky, 1984.

** Concentration prévue pour entreposage de courte durée pendant l'hiver, par temps froid.

*** Concentration prévue pour entreposage pendant un an effectué à la fin de l'automne.

éviter les points humides, il faut aérer le grain traité à l'acide de façon à supprimer les gradients de température qui provoquent le déplacement d'humidité; il faut également nettoyer le grain avant l'entreposage et enfin utiliser un ventilateur approprié, donnant un débit d'aération convenable. Si l'aération est mal faite, la réabsorption peut se produire dans les couches supérieures du grain et l'humidité libre risque de descendre de la paroi du toit dans la masse du grain, diluant ainsi l'acide et permettant aux moisissures de se développer.

- Lorsque les grains traités sont en contact avec du ciment ou de l'acier non protégé. Les parois doivent être recouvertes de plastique ou de peinture résistant à l'acide (University of Kentucky, 1984).

Ensilage de végétaux verts

Des plantes vertes coupées ainsi que le foin vert coupé entreposés (ensilage de fourrage et de foin à teneur en eau moyenne), dans des silos verticaux et horizontaux, sont également sujets à des problèmes de détérioration et d'échauffement. La détérioration entraîne généralement une perte de 10 % de matières sèches, dans un silo de ciment ordinaire, utilisé selon les normes. De nouvelles structures en ciment comportent maintenant des parois de forte densité mais de faible porosité, ce contenant étanche cause moins de détérioration. On peut encore réduire les pertes en utilisant des techniques de remplissage appropriées ainsi que des distributeurs d'ensilage qui assurent un chargement uniforme. Des silos à limitation d'oxygène, pourvus d'un dispositif d'étanchéité efficace, peuvent réduire de 2 à 4 % les pertes des matières sèches. Les silos horizontaux non couverts ont toujours entraîné des pertes qui peuvent s'élever jusqu'à 32 %. Ces pertes peuvent être réduites de moitié si on couvre l'ensilage d'une feuille de protection étanche en polyéthylène, convenablement lestée et protégée des perforations (Pos, 1980). En utilisant le produit entreposé à une fréquence suffisante, on réduit les surfaces exposées à l'air ce qui diminue aussi les pertes.

Des problèmes d'échauffement et des feux peuvent se produire dans les silos verticaux à déchargement par le haut et par le bas. Avec les silos à déchargement par le haut, il faut vérifier si les portes et les parois sont bien étanches, sans aucune ouverture. Avec les modèles à déchargement par le bas, il faut garder fermés les panneaux mobiles du haut et du bas, afin d'éviter la création d'un effet de cheminée produit par l'air aspiré à travers le silo. La teneur en eau des produits ensilés joue un rôle important dans la prévention des feux et des dommages causés par l'échauffement. Le foin séché, par exemple, ne doit pas être ensilé au-dessous de 40 % de teneur en eau, sinon des feux peuvent éclater. Dans les silos à déchargement par le bas, la teneur en eau recommandée pour le foin séché se situe entre 40 et 55 % (R. Nelles, communication personnelle) et, dans les silos à déchargement par le haut, entre 50 et 65 % (Campbell, 1973). Le meilleur moyen d'éviter le risque de feu est d'utiliser une bonne technique de remplissage. Cela veut dire qu'il faut couper le fourrage au bon moment, faire attention au dessèchement, le hacher court et assurer un remplissage rapide avec des niveaux décroissant de matières sèches. Pour les silos non étanches, il faut former au sommet un bouchon de fourrage non desséché (Institution of Fire Engineers, 1970).

Produits manufacturés

Les produits manufacturés doivent être manipulés avec plus de soin que les produits non traités, car les défenses naturelles des grains ont été détruites mécaniquement. Ce sont des mélanges de matières finement divisées et d'additifs. De plus, ces produits sont souvent soumis à la chaleur en cours de transformation. Les précautions à prendre pour éviter la détérioration et l'échauffement sont les suivantes :

- Remplacer tous les 4 à 5 mois les filières d'agglomérés qui sont endommagées afin d'éviter la formation d'agglomérés brûlés et d'éliminer les fragments de métaux.
- Retirer les fragments de métaux car ils peuvent devenir des foyers de points chauds.
- Prendre soin de ne pas sécher exagérément les produits comme les farines de l'abrasin qui risquent de surchauffer (National Fire Protection Association, 1949). L'installation de dispositifs de vibration sur les parois du silo doit être faite selon les règles. Il faut utiliser ces dispositifs selon les normes afin d'éviter des problèmes de structure.
- Bien refroidir le produit avant de l'entreposer.

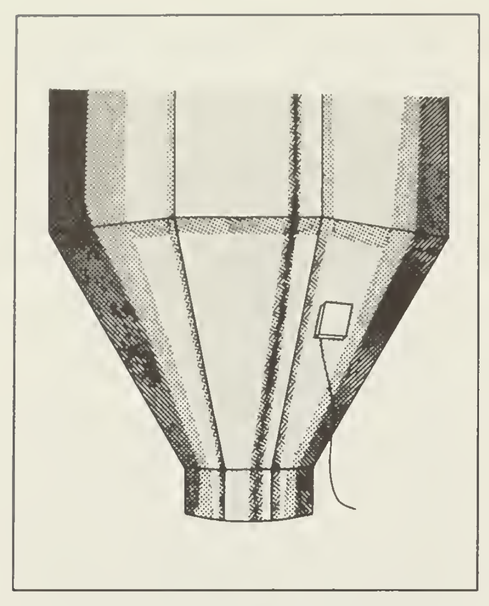


Figure 5 Dispositif de vibration magnétique installé à la base d'une cellule de fourrage dans le but d'éviter la formation d'adhérences et de ponts (Seedburo Equipment Co., Chicago).

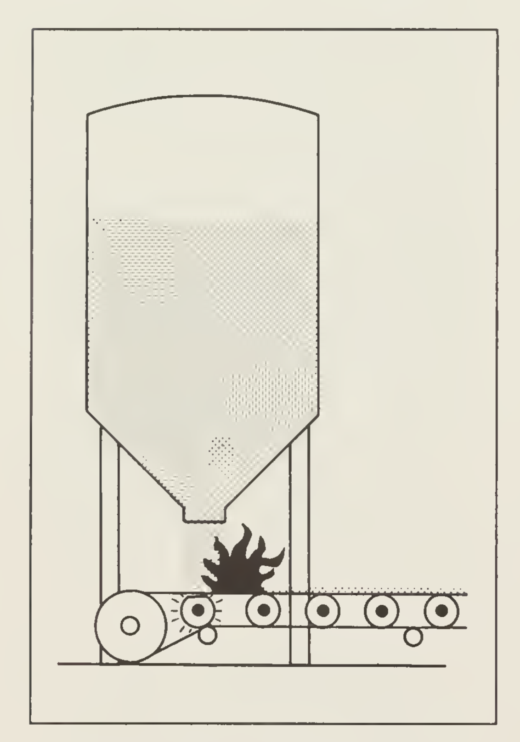


Figure 6 Incendie de convoyeur à courroie provoqué par la chaleur des frottements ou des étincelles électriques, résultant d'un mauvais entretien (d'après la Fire Protection Association, 1968).

- Installer des dispositifs de vibration sur les parois du silo de façon à éviter la formation de ponts et d'adhérences (fig. 5).
- Vérifier les convoyeurs de chargement et de déchargement pour éviter que des feux ne soient allumés par la chaleur des frottements ou les étincelles électriques (fig. 6).
- Éviter la contamination du produit avec des liquides susceptibles de provoquer un échauffement spontané.
- Entreposer le produit loin des sources de chaleur (Fire Protection Association, 1968, 1978).
- Nettoyer l'équipement de distribution alimentaire (Hamilton, 1985).

Nota: on doit bien installer et bien utiliser les appareils vibrateurs qu'on fixe aux murs des cellules, sinon on peut avoir des problèmes de structure.

FORMATION

La première mesure à prendre contre les problèmes de détérioration et d'échauffement dans les silos est d'avoir un personnel bien informé. Il doit bien connaître les caractéristiques de conservation des différentes denrées, les teneurs en eau, les processus de déplacement d'humidité dans les réservoirs, les silos et les navires, les causes des problèmes qui peuvent survenir, l'importance des inspections régulières et d'un bon système de compte rendu. Des cours de formation de courte durée et d'instructions données sur place suffisent pour acquérir ces connaissances.

Chapitre 5 Détection des détériorations et des échauffements

On détecte les détériorations et les échauffements dans des denrées entreposées en notant l'apparition de certaines caractéristiques distinctes, en surveillant régulièrement l'environnement et en examinant attentivement des échantillons. Certains signes distinctifs, comme de la neige fondue sur les toits ou des odeurs de putréfaction, permettent de reconnaître des stades très avancés de détérioration et d'échauffement tandis que d'autres signes, comme des niveaux de CO_2 légèrement supérieurs à ceux de l'air ambiant, permettent de reconnaître les stades précoces ou même le tout début d'une détérioration. Le tableau 6 regroupe une liste de signes distinctifs qui permettent de détecter des stades précoces, intermédiaires ou avancés de détérioration et d'échauffement. Les signes distinctifs sont classés selon les différents critères suivants : (a) de l'extérieur de la structure d'entreposage; (b) à l'intérieur des silos, au-dessus des produits entreposés; (c) pendant la manutention des stocks; (d) durant la surveillance des stocks en entreposage; (e) après examen des échantillons en laboratoire.

EXTÉRIEUR DE LA STRUCTURE D'ENTREPOSAGE

Odeurs

Les détériorations et les échauffements peuvent à l'occasion être détectés de l'extérieur de la structure d'entreposage grâce à une modification très nette de l'odeur normale des produits entreposés. Des odeurs de brûlé ou de putréfaction signifient qu'une grande quantité des produits est probablement à un état avancé de détérioration ou d'échauffement. Après l'inondation causée par la Red River au Manitoba, au printemps 1979, (fig. 18*a*) les silos de céréales endommagés dégageaient des odeurs de putréfaction. Dans la même province, à l'automne de la même année, des graines de féveroles, gravement endommagées par la chaleur, répandaient à l'extérieur une odeur de brûlé. Ces odeurs étaient associées à une détérioration ou un échauffement avancés. On pouvait les sentir à plusieurs centaines de mètres des silos.

Neige fondue

L'absence de neige sur le toit d'un silo alors qu'il y en a sur les autres silos est un signe d'échauffement avancé. De même la fonte de la neige autour d'un silo sur un rayon de plusieurs centimètres indique un échauffement prononcé.

Libération de liquides

Dans certains cas d'échauffement avancé, en particulier lorsqu'il s'agit de graines humides, le contenu du réservoir ou du silo est chauffé à un point tel qu'il se produit une distillation. Il se forme un liquide brun qui se fraie un chemin à travers les joints des silos métalliques ou les fissures des réservoirs de béton, et il arrive même que ce liquide forme des flaques sur le sol à l'extérieur des structures. Un tel phénomène peut se produire dans les entreposages de graines de soja et de graines de féveroles (Mills, 1980).

Vapeur, fumée et flammes

Le processus de distillation décrit au chapitre précédent peut entraîner la production de vapeur qui s'échappe par les panneaux d'ouverture du toit. De l'extérieur, on peut même remarquer de la fumée et des flammes, qui se dégagent lorsque des matières surchauffées entrent en contact avec l'air, soit aux points d'attache des aérateurs, sous les planchers de séchage, soit dans les espaces libres qui se trouvent à la partie supérieure de la structure d'entreposage. La fumée et les produits ionisés qui se dégagent au cours des premières phases d'un feu à l'intérieur des structures, par exemple dans la cale d'un navire, peuvent être décelés au moyen de détecteurs de fumée et autres.

Thermographie

La thermographie est une méthode qui consiste à produire des images colorées à partir de radiations thermiques invisibles (Wishna, 1979). Les variations de température des produits entreposés à l'intérieur des silos peuvent donc être rendues visibles et enregistrées sur pellicule (Boumans, 1985; Rispin, 1978; Wishna, 1979). Cette technique est très utile, car elle permet de détecter rapidement les feux dans les grains entreposés dans de gros silos de béton, et d'en déterminer l'étendue. Certains dispositifs permettent de mesurer la température. Ces dispositifs sont coûteux, mais on peut les louer chez des compagnies locales de conservation de l'énergie ou signer des contrats de service.

À L'INTÉRIEUR DES SILOS, AU-DESSUS DES PRODUITS ENTREPOSÉS

Brume de chaleur

Lorsqu'on regarde dans un plan horizontal l'air qui se trouve au-dessus de la surface des produits entreposés, cet air semble alors miroiter. Cette brume de chaleur provient d'une source de chaleur qui se trouve dans le produit et est le signe d'un échauffement avancé à l'intérieur de la masse.

Vapeur

Lorsque les denrées entreposées contiennent de fortes teneurs d'eau ou des matières non mûres, de la vapeur peut se dégager de la surface; c'est le signe d'un échauffement avancé. En 1982, au Manitoba, au cours d'une inspection de silos qui contenaient des graines de canola endommagées par le gel, on a détecté un échauffement avancé dans un silo de bois grâce à une colonne de vapeur qui s'échappait de la surface centrale. Les graines de canola avaient une teneur en eau qui se situait entre

Tableau 6 Détection de la détérioration et de l'échauffement dans les produits entreposés

Circonstances de la détection	Caractéristiques observées	Indication de : Risque de dét.	Risque d'éch.
À l'extérieur	- Odeur (de putréfaction)	A	–
	- Odeur (de brûlé)	–	A
À l'extérieur : parois, toit	- Neige fondue sur le toit; espace entre la structure et la neige environnante	–	A
	- Liquide brun s'écoulant sur le sol par les joints des parois	A	A
	- Fumée, gaz, vapeurs, feu	–	A
	- Zones chaudes à proximité de la paroi de la cellule, visibles à la thermographie	–	A
	- Changement de coloration de la peinture ou de l'étiquette thermosensibles	–	A
À l'intérieur : au-dessus des stocks	- Brume de chaleur au-dessus de la surface	–	A
	- Colonne de vapeur s'élevant au-dessus de la surface	A	A
	- Odeur (de moisi)	I	–
	- Graines germées, formation de ponts, moisissures visibles (vertes, bleues, jaunes, blanches)	A	–
	- Sonde d'échatillonnage en profondeur difficile à introduire dans la masse	I,A	–
Pendant le déplacement des stocks	- Blocage de l'auget	A,I	–
	- Inflammation des matières en combustion lente	–	A
	- Présence dans les stocks de matières noires fondues chaudes ou froides	–	A,I
	- Présence d'insectes, formation de ponts dans la région centrale	I	I
En cours de surveillance des denrées entreposées	- Température supérieure (I,D) ou très supérieure (A) à la température prévue (mesurée au moyen de tiges, de thermomètres, de thermocouples ou de câbles)	A,I,D	A,I,D
	- Élévation de la teneur en eau qui dépasse le niveau de départ, en particulier à proximité de la surface	I,D,	–
	- Élévation des niveaux de CO_2	I,D	–
	- Prélèvement d'échantillons	A,I,D	A,I,D

(suite)

Tableau 6 Détection de la détérioration et de l'échauffement dans les produits entreposés (*fin*)

Circonstances de la détection	Caractéristiques observées	Indication de : Risque de dét.	Risque d'éch.
Examen détaillé des échantillons au laboratoire	- Présence de matières brunes ou noires, quelquefois fondues	–	A,I
	- Odeur de tabac à l'écrasement	–	I
	- Présence de moisissures d'entreposage de couleur verte, bleue, jaune ou blanche	I,D	I,D
	- Présence de champignons *Monascus* et *Paecilomyces*, révélant un traitement défectueux du grain à l'acide	I,D	–

Explications :

D = Début de la détérioration, d'échauffement

I = Stade intermédiaire de détérioration, d'échauffement

A = Stade avancé de détérioration, d'échauffement

9,1 et 14,1 %, et elles avaient atteint la température de 102 °C après seulement 10 jours d'entreposage (Mills et coll., 1984).

Germination et formation de ponts

La présence de graines germées, souvent avec des pousses vertes verticales, au centre de la surface des tas, indique que le niveau de teneur en eau dans les couches supérieures est non seulement assez élevé pour entraîner la germination des graines, mais encore plus que suffisant pour favoriser les détériorations par moisissures. Des grains germés sont également un signe que la circulation d'air se fait mal dans le silo ou qu'il existe des fuites dans le toit, et elles sont souvent associées avec la formation d'un pont supérieur ou d'une couche de croûte en travers du silo. Le meilleur moyen de détecter la présence d'un pont est de se servir d'une perche.

Évaluation de la résistance

En poussant vers le bas une sonde à grain, on peut se rendre compte de l'étendue verticale du pont et également du degré d'agglomération entre les grains qui se trouvent dessous. S'il est difficile ou impossible de pousser la sonde plus loin vers le bas, on peut soupçonner qu'il existe une agglomération et un durcissement des grains causés par l'activité des moisissures.

Moisissures

Les moisissures bleues, vertes, jaunes, oranges ou blanches à la surface d'un chargement de grains ou à l'intérieur d'un pont indiquent que la teneur en eau et la température favorisent le développement de ces moisissures. Des odeurs de moisi sont souvent associées avec le développement de moisissures d'entreposage dans le grain.

DÉPLACEMENT DES PRODUITS ENTREPOSÉS

Il arrive fréquemment qu'on détecte des problèmes dans des produits entreposés en vrac en faisant déplacer de 5 à 10 tonnes de produits par le bas du silo pour voir s'ils s'écoulent librement ou si l'on peut noter une odeur acide, une odeur de moisi (révélant une détérioration par les moisissures) ou une odeur de tabac (échauffement), ou autres anomalies.

Blocage de l'auget

Lorsqu'on décharge le silo, les augets peuvent cesser de fonctionner. Ils sont bloqués par des matières légèrement agglomérées ou en masses compactes résultant d'une activité des moisissures (soit localisées, soit plus étendues); cela signifie qu'il y a un niveau intermédiaire ou avancé de détérioration. Si un auget situé sous le plancher est muni de multiples ouvertures et que celles-ci sont toutes ouvertes (selon une pratique répandue), le blocage de l'ouverture centrale peut entraîner un déchargement excentré, risquant d'entraîner des problèmes de structure.

Fusion par la chaleur

Dans les matières déchargées, on trouve quelquefois de gros morceaux de produits fusionnés de couleur noire. On remarque tout de suite ces blocs dans des augets obstrués ou sur des grilles, par exemple, au moment du déchargement de wagons. Ils peuvent être extrêmement chauds et provenir d'un échauffement biologique et chimique avancé. S'ils sont vraiment très chauds, ces blocs peuvent s'enflammer spontanément lorsqu'ils se trouvent exposés à l'air en cours de déchargement. Ces blocs représentent donc un risque sérieux de feu et d'explosion dans les élévateurs; c'est pourquoi ils doivent être traités avec le plus grand soin.

Feu sans flamme et sans fumée

Un échauffement avancé peut se produire en profondeur dans la partie inférieure des silos de béton de grande dimension et le feu peut

couver pendant des mois dans les matières entreposées. Ces problèmes d'échauffement sont souvent détectés pour la première fois lorsqu'on déplace les produits entreposés et lorsque les produits qui brûlaient sourdement en profondeur dans le silo se trouvent exposés à l'air. À ce moment, il s'en dégage une fumée considérable et une odeur de brûlé; on peut même voir des flammes et des blocs de produits fusionnés de couleur noire.

Insectes

Le déplacement des grains révèle quelquefois des infestations par les insectes insoupçonnées. Dans un élévateur terminal de la Colombie-Britannique, un silo de grande dimension avait été utilisé pour des résidus de nettoyage de blé et d'orge pendant plusieurs années sans être vidé. Au cours d'un déchargement partiel du silo, on découvrit une importante infestation par les insectes, qu'on traita par fumigation; mais le problème se reproduisit. Lorsqu'on vida le silo, on décrouvrit un pont à mi-hauteur, bien développé, composé de matières à forte teneur d'eau dont une partie était dans un état de détérioration intermédiaire. Le pont fournissait en effet un abri idéal pour le développement des insectes.

SURVEILLANCE DES TAS

La plupart des méthodes de détection décrites précédemment constituent des moyens de reconnaître la présence de niveaux intermédiaire ou avancé de détérioration ou d'échauffement dans des denrées entreposées. Par contre, la surveillance des tas *in situ* constitue le meilleur moyen de détecter des stades précoces ou initiaux. On emploie essentiellement quatre méthodes de surveillance : la mesure de la température, de la teneur en eau et de l'humidité relative, la mesure du CO_2, ainsi que les prélèvements et examens d'échantillons.

Température

Lorsqu'on relève, à l'intérieur des tas, des températures beaucoup plus élevées que celle de l'air atmosphérique, ce phénomène correspond généralement à un échauffement, mais dans certains cas, il est provoqué par la chaleur des champs qui s'est maintenue dans les tas. Dans la partie centrale des silos sans aération, en particulier ceux qui sont d'un diamètre important, les températures sont plus élevées en hiver que celle du grain environnant ou celle de l'air ambiant, parce que le produit est resté à la température du début de l'entreposage. Dès le début de l'entreposage, il faut donc surveiller régulièrement les températures des diverses parties des tas ainsi que celle de l'air atmosphérique afin de déterminer si les tas sont réellement en train de s'échauffer. À titre d'exemple, on a déterminé la température de l'air ambiant et celle du grain entreposé à 1 m et à 2 m des parois de deux silos de 4 m de diamètre. Ces températures étaient respectivement les suivantes: –5 °C, 4 °C et 14 °C et, pour l'autre silo, –5 °C, 6 °C et 31 °C; comme la température du grain au remplissage du silo était de 18 °C, cette température de 14 °C peut être considérée comme provenant de la chaleur des champs et celle de 31 °C comme provenant probablement d'un échauffement biologique.

La surveillance des changements de température et la détection de l'échauffement à l'intérieur des tas s'effectuent au moyen de thermomètres de cellules, de thermocouples, de thermistors, de câbles de détection de température, de dispositifs de thermographie, de peinture ou d'étiquettes thermosensibles, ou de sondes métalliques plantées verticalement.

Les **thermomètres de cellule** s'emploient avec le grain, mais on peut également les utiliser pour d'autres produits. Ces appareils consistent en un thermomètre au mercure (en verre) inséré à l'intérieur et près de l'extrémité d'un tuyau métallique pointu dans lequel viennent se visser d'autres sections de tube et une poignée en forme de T destinée à enfoncer le thermomètre jusqu'à la profondeur désirée. Ce type de thermomètre permet de vérifier les températures dans des endroits très variés. Parmi les inconvénients, on peut citer une courte distance de pénétration (avec un risque de ne pas atteindre avec précision la zone d'échauffement) ainsi que le temps et les difficultés que présente leur manipulation. Une méthode plus pratique consiste à attacher les thermomètres à un fil métallique et à les introduire dans des tubes d'acier installés dans le grain, ce qui permet d'obtenir une pénétration plus profonde et de disposer plusieurs thermomètres le long du tube (Medders, 1975). Cependant le thermomètre au mercure et les tubes métalliques peuvent prendre de 10 à 30 minutes pour capter la température réelle du grain, à cause du faible facteur de diffusion thermique du grain.

Les **thermocouples** sont constitués de deux fils métalliques généralement en cuivre et en constantan, qui se rejoignent électriquement à une extrémité. Les thermocouples changent d'impédance lorsqu'ils sont exposés à des différences de température et, reliés à un dispositif de surveillance, permettent de détecter les augmentations de température. Grâce à ces dispositifs, on peut surveiller les températures qui se situent entre –70 et 400 °C, et plus encore si l'on utilise des câbles de céramique. Les dispositifs de surveillance de silo pour le grain qui fonctionnent sur le principe des thermocouples varient des simples fils ou sondes de thermocouples attachés périodiquement à des dispositifs de surveillance portatifs jusqu'aux systèmes qu'on peut trouver dans le commerce et qui utilisent des câbles multibrins attachés de façon permanente à des systèmes de surveillance munis d'alarme et qui enregistrent continuellement la température. On peut introduire les thermocouples dans le grain soit avant, soit après le remplissage des silos (Lyster, 1983).

Les **thermistors** sont de petits dispositifs ressemblant à des résistors qui sont utilisés pour mesurer les changements de température, avec cet avantage qu'on peut employer du simple fil à haut-parleur au lieu du fil à thermocouple plus coûteux (anonyme, 1985). Ce type d'appareils est particulièrement précieux pour les silos de plus petite dimension. Du fait que les thermocouples et les thermistors ne détectent que les changements de

température qui se produisent à distance relativement faible, il est conseillé de placer ces détecteurs aux endroits où l'échauffement a le plus de chance de se produire. Dans l'Ouest canadien, on place ces détecteurs dans les endroits suivants : au centre de la partie supérieure des silos, à des profondeurs de 30 cm, 45 cm, 1 m et 2 m.

Les **câbles de détection de température** sont généralement recommandés pour des capacités de 544 t et plus. Pour des silos de 544 t, on suspend quatre câbles à partir du toit (fig. 7). On monte le câble du centre sur un côté du centre du silo, de façon à réduire la traction qui est exercée sur le câble lorsqu'on décharge le grain. On dispose les détecteurs à intervalles allant de 1,2 à 1,5 m le long de chaque câble (McKenzie et coll., 1980). Pour les silos de plus grande capacité, on utilise un plus grand nombre de câbles (Boumans, 1985; Foster et Tuite, 1982). Pour les câbles qui dépassent 6 à 9 m de longueur, on fixe des supports au toit et aux parois du silo, car dans la plupart des cas, les toits de silos ne sont pas suffisamment résistants et l'on risque de décrocher les câbles ou de défoncer le toit (communication personnelle, G. Henry, 1986).

La **thermographie** est quelquefois employée dans des ensembles de silos de grande capacité pour détecter l'échauffement de matières entreposées inaccessibles ainsi que l'équipement électrique et mécanique. La thermographie est particulièrement utile pour détecter et déterminer l'étendue des feux de grain dans des silos de grande capacité, où ces feux peuvent couver pendant de nombreux mois sans se manifester (Boumans, 1985; Rispin, 1978; Whishna, 1979). Des caméras à imagerie thermique ont été récemment utilisées pour déterminer l'emplacement de feux et les niveaux de chaleur dans un feu qui persistait à bord d'un navire dans des chargements d'aliments pour bétail à l'état humide, d'huile et d'autres substances produisant une fumée intense (Fire Protection Association, 1986).

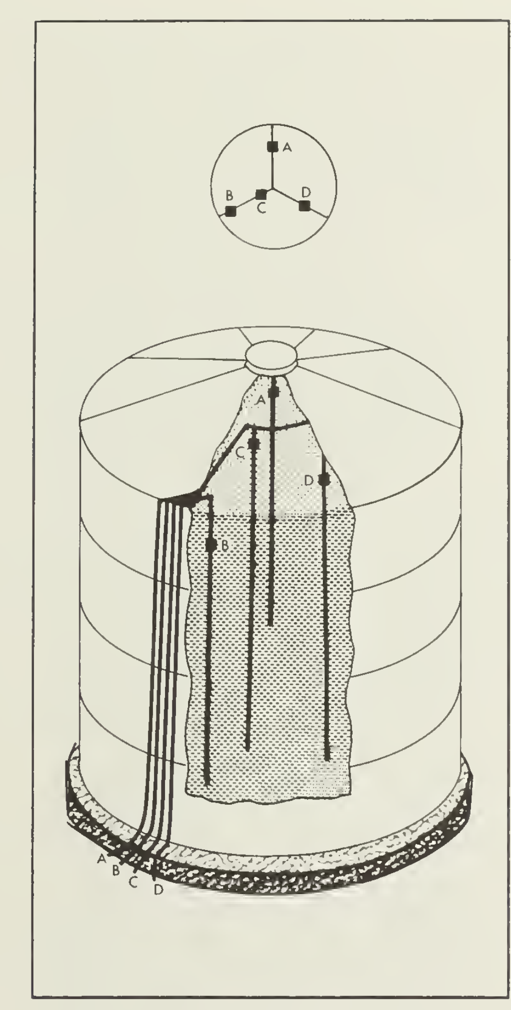


Figure 7 Système de surveillance de la température des silos d'entreposage en quatre câbles capteurs de *A* à *D*, suspendus à partir du toit. Les câbles *A*, *B* et *D* sont situés à mi-chemin entre la paroi et le centre de la cellule tandis que *C* est à proximité du centre. (Noter que les câbles d'une longueur dépassant 8 à 12 m ont besoin de ferrures de soutien (McKenzie et coll., 1980).

On peut trouver dans le commerce une **peinture sensible à la température** que l'on applique par petites bandes sur le toit et les parois d'un silo, ainsi que des **étiquettes thermosensibles** que l'on pose sur des équipements; elles permettent d'effectuer *de visu* une surveillance rapide. Mais elles ne sont pas réutilisables et ne permettent de déceler que des températures excessives du toit ou des parois, supérieures à celles qui résultent d'autres causes naturelles comme les radiations solaires.

Sondes de métal En insérant des tiges de 1 cm de diamètre et de 3 à 4 m de long, dans la masse du grain pendant 15 min, puis en les retirant, on peut détecter rapidement des accroissements de température.

Limitations des systèmes d'enregistrement de température

Les systèmes d'enregistrement de température sont un élément important de la surveillance des entrepôts de grains, car si l'on effectue fréquemment des mesures, il est possible de détecter d'importantes élévations de température. Néanmoins, ces dispositifs ont leurs propres limites, et dans un souci d'efficacité, on doit les employer en association avec d'autres méthodes de détection. Dans certains cas, des détériorations peuvent se produire sans qu'apparaissent des élévations de température détectables. Par ailleurs, des points chauds peuvent échapper à la détection, car les détecteurs de température ne fonctionnent que pour des distances inférieures à 30 ou 60 cm et, d'autre part, la chaleur provenant d'une poche d'échauffement ne se propage que très peu (Lyster, 1983). Une légère élévation de température du grain, enregistrée par les thermocouples au-dessus et sur le côté d'un point chaud peut constituer la seule indication d'une détérioration importante dans un silo de grande dimension. Si cette détérioration est négligée ou non détectée, il peut y avoir une grande quantité de grains rendus au stade final de détérioration, avant qu'on ait pu détecter le problème (Christensen et Kaufmann, 1972). Pour détecter les points chauds qui se développent entre les emplacements des détecteurs, il est nécessaire d'utiliser un thermomètre à grain ou une sonde thermique portative attachée à un dispositif de surveillance, ou de prélever des échantillons au moyen d'une sonde à grain.

Les détecteurs de température sont par ailleurs insensibles aux infestations par les insectes, qui se développent dans le grain chaud. Au cours de l'automne 1981, dans

l'Ouest canadien, une grande partie du grain a été moissonnée à 30 °C et plus, et le grain situé au centre des silos est resté à cette température élevée pendant plusieurs semaines. Un fermier qui aurait inspecté les silos n'aurait observé aucun changement de température, et aurait supposé que le grain était en bon état. Et pourtant, un grand nombre de ces silos contenait des populations en phase de multiplication rapide de cucujides roux impossibles à détecter par des mesures de température, mais facilement reconnaissables au moyen d'une simple sonde à grain (Lyster, 1983), ou des pièges à insectes placés dans le grain (Loschiavo et Atkinson, 1973).

Teneur en eau

Les changements de température dans le grain sont généralement surveillés en prélevant des échantillons de grains dans la masse, et en procédant à des déterminations de teneur en eau au moyen de méthodes de laboratoire comme des humidimètres électriques ou des étuves à dessiccation. La même opération s'effectue actuellement au moyen de détecteurs à distance (Gough, 1974, 1980; Waterer et coll., 1985) (fig. 8).

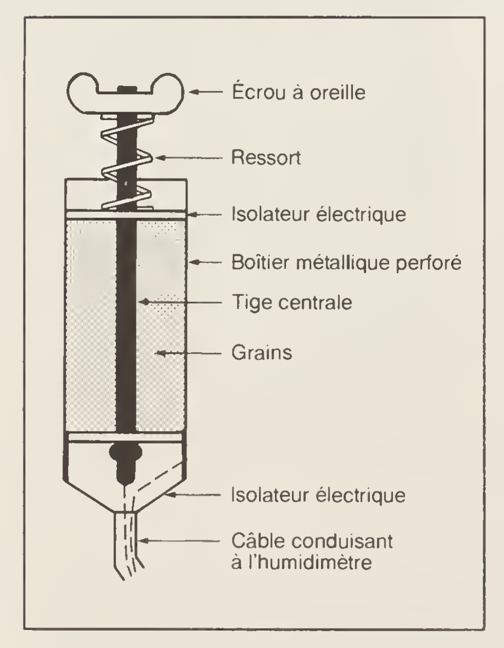


Figure 8 Vue schématique d'un palpeur destiné à surveiller l'humidité dans les grains entreposés (d'après Gough, 1980).

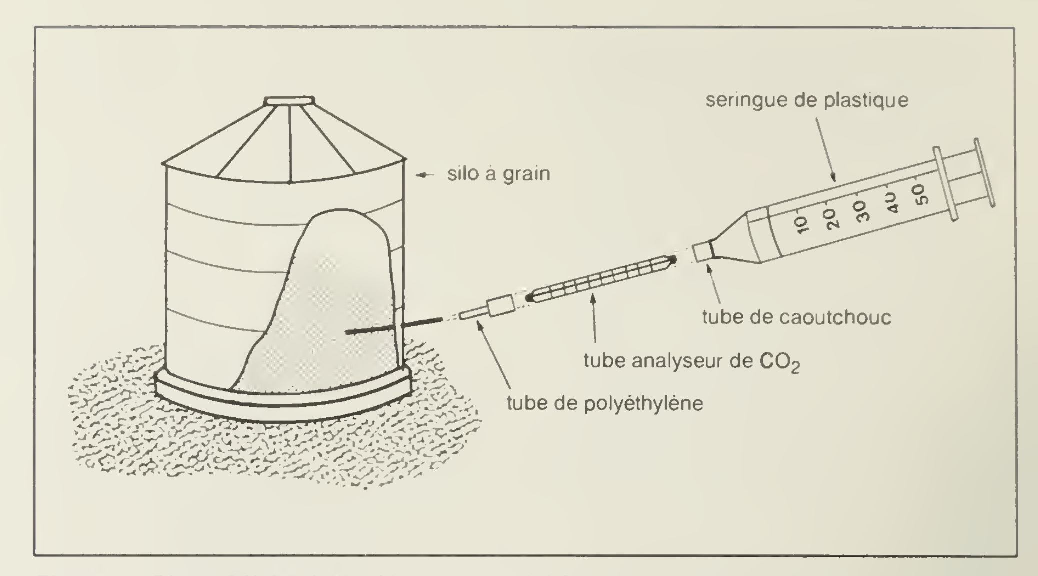


Figure 9 Dispositif destiné à détecter les détériorations du grain par le CO_2.

On a décrit les détecteurs d'humidité de Reethorpe (Gough, 1974) dont certaines modifications sont utilisées dans le New South Wales (Australie) pour surveiller la teneur en eau de riz décortiqué et entreposé dans des silos horizontaux de 4 m de profondeur. Ils ont également été utilisés par des ingénieurs d'entreposage de Tropical Development and Research Institute de Londres (Grande-Bretagne), pour détecter les changements de teneur en eau qui se produisent dans du riz brun en vrac entreposé dans des silos métalliques de 100 t, en Corée du Sud, où des étés tropicaux succèdent à des hivers continentaux. Le riz avait été entreposé sans aération, avec une teneur en eau de 13,5 % (matière mouillée) pendant 8 mois, si bien que la surface supérieure était devenue moisie à la fin de la période d'entreposage. Les détecteurs avaient été insérés dans les silos en cours de remplissage et l'on avait constaté que l'humidité se déplaçait en direction du sommet et vers la paroi nord, pour finalement donner une teneur en eau accrue de 7 et 3 % respectivement, (Gough et coll., 1987). On conclut que les dispositifs de Reethorpe, surtout placés à la surface, sont capables de détecter des changements de teneur en eau d'origine climatique, ainsi que les détériorations à leur stade initial. Dans des régions tropicales, ces dispositifs de détection sont souvent situés dans de mauvais emplacements; au lieu de les mettre au milieu de la masse des grains comme on le fait dans les climats tempérés, il est préférable de les disposer en fonction de l'orientation du soleil (J.A. Hallam, communication personnelle, 1986). Les détecteurs d'humidité sont plus coûteux que les détecteurs de température, mais comme ils donnent une indication directe de la teneur en eau, cela vaut la peine de payer plus cher.

Dioxyde de carbone (CO_2)

Une légère détérioration du grain, causée par des moisissures, des acariens et des insectes, peut être détectée dans les silos par la mesure de concentration en CO_2 de l'air intergranulaire. Comme ces organismes produisent du CO_2 en respirant, on peut les détecter par la mesure des concentrations de CO_2 avant que ne se produise une détérioration plus sérieuse. Dans l'air, la concentration du CO_2 est de 0,03 %; pour une légère détérioration, elle est de 0,08 à 0,1 %; pour une détérioration importante, elle est de 2 % ou plus; et dans les points chauds, elle est d'environ 5 à 7 %.

Pour mesurer les niveaux de CO_2 dans les grains ou autres denrées entreposées, on a mis au point, à la Station de recherches de Winnipeg, un appareil simple (fig. 9), soit une seringue de plastique d'environ 50 ml, un tube d'analyse CO_2 que l'on peut trouver dans le commerce et une tubulure de polyéthylène et de caoutchouc. Pour déterminer les niveaux de CO_2, la tubulure de polyéthylène est insérée dans le grain, avec la seringue et le tube

analyseur de CO_2 attachés à une extrémité; l'air est aspiré dans la seringue et le niveau de CO_2 se mesure au moyen de l'échelle à code de couleurs. Les tubes analyseurs se trouvent dans le commerce et permettent de mesurer la teneur en CO_2, suivant les modèles : de 0,01 à 0,3, de 0,1 à 1,2, de 0,5 à 6,0, de 0,5 à 10,0, de 1,0 à 20,0 et de 5 à 60 % de CO_2. L'appareil et son mode d'emploi sont décrits en détail par Wilkins (1985*a*).

Cette technique permet de détecter avec précision les détériorations et les infestations par les insectes dans des silos de grains de façon plus précoce qu'avec les appareils de mesure de température ou de teneur en eau. Elle est particulièrement utile dans le cas des silos de grande capacité ainsi que le montrera l'exemple suivant. Au printemps 1985, un chargement de blé de 544 t préalablement aéré et entreposé l'automne précédent avec une teneur en eau de 10,1 à 14,7 % (moyenne 14,2 %) et une teneur en CO_2 de 0,03 % (normale) a présenté une soudaine augmentation des niveaux de CO_2. On a placé trois tubes à prélèvement de gaz près de la paroi, au centre et à mi-chemin à 30 cm au-dessus du plancher. L'extrémité de ces tubes était recouverte de grillage, afin que les débris ne l'obstruent pas. Au long de l'hiver et au début du printemps, la moisissure s'accumula près du plancher et autour de la périphérie des parois des silos. Au début de mars, les concentrations de CO_2 augmentèrent soudainement, passant de 0,1 à 1,1 % en 5 semaines dans cette région. On aéra le grain, afin de réduire la teneur en eau. Moins d'une tonne de grain fut endommagée; mais sans détection précoce, dans un si gros silo, les dommages auraient pu être plus considérables. De plus, ce grain était destiné à l'alimentation des porcs et de graves problèmes sanitaires auraient pu se présenter si des moisissures s'étaient développées et avaient été introduites dans leurs rations.

Prélèvement d'échantillons

En prélevant régulièrement des échantillons du grain entreposé, il est possible de détecter des détériorations existantes ou potentielles, ainsi que des problèmes d'échauffement avant que des dommages considérables ne se produisent. Pour repérer les régions dangereuses, il faut opérer des prélèvements de façon systématique et en certains emplacements précis. Ces prélèvements doivent être faits chaque semaine ou plus fréquemment au début, afin de vérifier que la teneur en eau et la température sont appropriées. À condition que la teneur en eau et la température se soient stabilisées et que la température à l'intérieur du silo soit inférieure à 0 °C, les intervalles entre prélèvements d'échantillons peuvent être portés à un mois ou plus. Il faut évidemment procéder à des prélèvements d'échantillon dès qu'apparaissent des signes évidents de détérioration, par exemple des odeurs anormales ou de moisi, ou de la vapeur d'eau qui s'échappe de la masse des grains.

On obtient des échantillons de grains représentatifs en utilisant des outils spécialisés et des méthodes normalisées. L'*échantillonneur cloisonné* (fig. 10*a*) est un modèle très largement utilisé. Il permet d'obtenir des échantillons en vue de détecter les infestations par les insectes, d'évaluer la détérioration du grain et son humidité. Il s'agit d'un tube de laiton double long de 1,5 m divisé en deux compartiments pour faire des prélèvements à des profondeurs déterminées. On remplit l'échantillonneur en l'enfonçant sur toute sa longueur dans le grain, à un angle de 10° avec la verticale, les compartiments fermés et tournés vers le haut; on tourne la poignée pour ouvrir les portes des compartiments et en remuant l'appareil rapidement, vers le haut et vers le bas, trois fois, dans la masse du grain. Après fermeture des portes, l'appareil est enlevé, et on le vide après l'avoir posé sur un morceau de tissu pour recueillir le grain lorsqu'on ouvre les portes. Pour obtenir des échantillons en surface, l'échantillonneur est poussé horizontalement à environ 7,5 cm sous la surface du grain. L'*échantillonneur à cuiller* (fig. 10*b*) permet de prélever des échantillons à des profondeurs plus grandes qu'avec l'autre modèle. Cet échantillonneur à cuiller de laiton est enfoncé dans le grain, et l'on peut y ajouter des rallonges de 90 cm afin d'atteindre les profondeurs désirées. En tirant sur la poignée, on ouvre la cuiller, ce qui permet de la remplir de grain. Des *échantillonneurs pneumatiques* (fig. 10*c*) permettent d'obtenir des échantillons de grains dans des silos profonds. Les emplacements privilégiés sont au centre et à proximité des parois chauffées par le soleil ou d'autres sources de chaleur. Des sections de tube de prélèvement sont reliées à une pompe à air cyclone qui fournit la force d'aspiration nécessaire pour remonter les échantillons et pour pousser la sonde plus profondément dans la masse. Au moyen de cet équipement, deux hommes peuvent, en une journée de travail, faire six ou sept échantillonnages sur 24 m, selon les types de grains et les différentes teneurs en eau.

On peut utiliser des plans d'échantillonnage pour localiser des points chauds ou des populations nuisibles à l'intérieur des denrées entreposées. L'Université du Kentucky (1984) a réalisé des plans détaillés convenant à des silos verticaux circulaires, des réservoirs horizontaux et des silos surremplis. Laewer et coll. (1981) ont donné des plans détaillées pour effectuer des échantillonnages représentatifs de silos circulaires de 4,5 à 18 m de diamètre. Ces échantillons permettent de déterminer la teneur en eau et la température. Kramer (1968) a fait la même chose pour les wagons couverts.

EXAMEN DES ÉCHANTILLONS

Au laboratoire, chaque échantillon est codé et on enregistre son origine, son historique, la date du prélèvement, la nature de la récolte, la variété et autres détails. Chaque échantillon est alors soigneusement mélangé et certaines parties sont mises de côté en vue de tests spécifiques dont la plupart peuvent être exécutés rapidement de façon à donner une évaluation de l'état de l'échantillon.

Teneur en eau

Il est d'une importance vitale de connaître la teneur en eau des grains qui remplissent un silo, car cela permet largement de déterminer les risques d'entreposage. Si la teneur en eau de certains grains dans un silo est

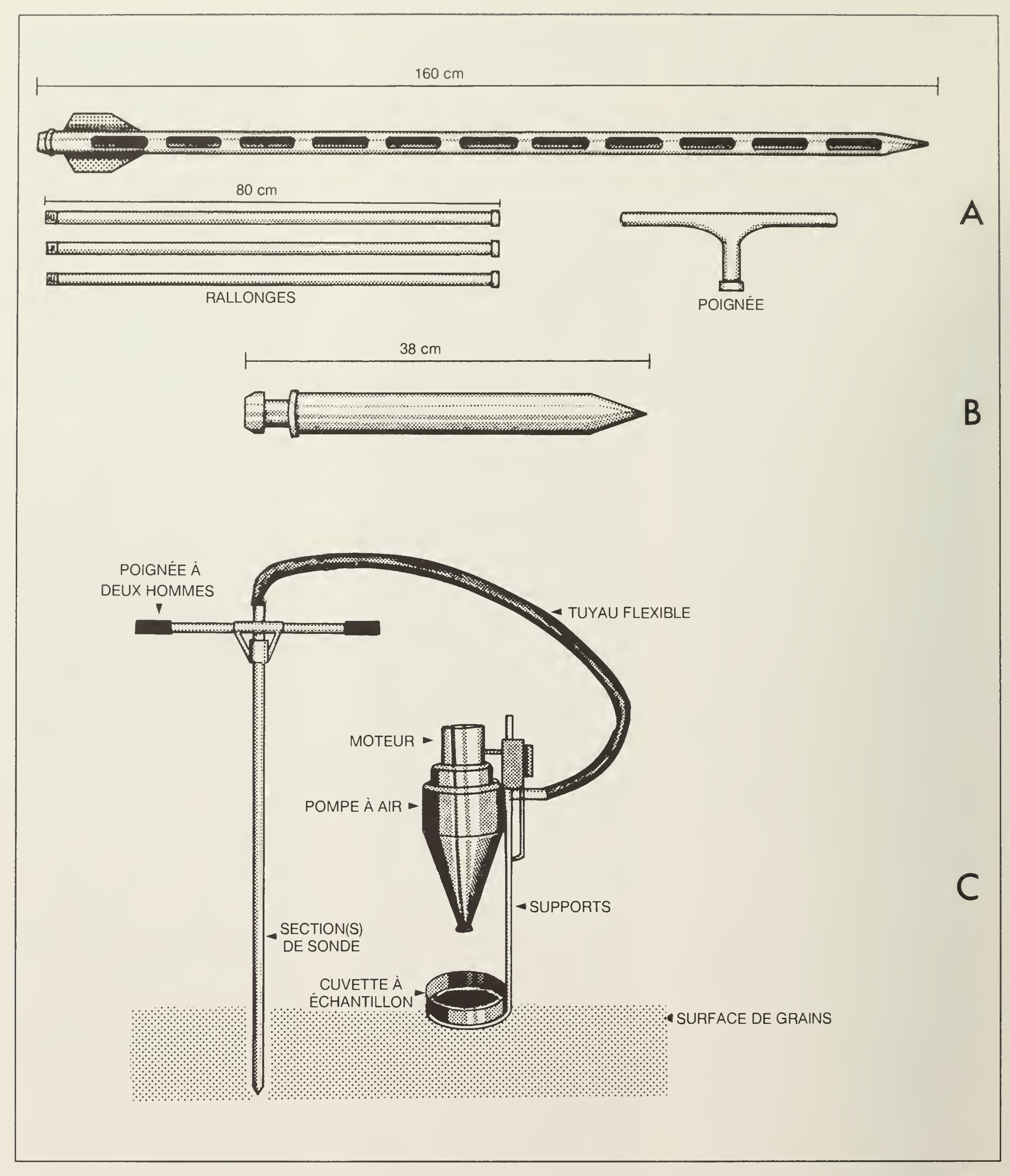


Figure 10 **Équipement destiné à l'échantillonnage du grain en profondeur : *A*, échantillonneur de silo en profondeur, avec ailerons; *B*, sonde torpille; *C*, échantillonneur de grains pneumatique (Seedburo Equipment Co., Chicago).**

suffisante pour entraîner le développement de moisissures et de détérioration, la détection rapide de ces éléments douteux permet d'éviter des problèmes de détérioration et d'échauffement.

On peut déterminer la teneur en eau de différentes façons : l'étuve à air chaud et des dispositifs électroniques (capacitance et résistance électriques). L'étuve est très employée et on a fixé des méthodes pour de nombreuses denrées; par exemple pour le blé contenant moins de 25 % de teneur en eau, la norme ASAE est de chauffer 15 g dans un four à air chaud, ou étuve, à 130 °C pendant 19 heures. Après cette opération, les échantillons doivent être refroidis avant d'être pesés pour éviter les problèmes de pesage causés par les courants d'air produits par les contenants chauds des échantillons. On utilise beaucoup les méthodes électroniques dans les installations d'entreposage de grain. Ces méthodes sont relativement précises et rapides, mais elles ont certains défauts. La plupart des dispositifs électroniques servant à mesurer la teneur en eau ne conviennent pas au grain à forte teneur en eau, car leur sensibilité diminue à mesure qu'augmente la teneur en eau. De plus, ces dispositifs doivent être étalonnés périodiquement par rapport aux résultats obtenus avec la méthode de l'étuve à air chaud. On peut trouver de récentes évaluations effectuées sur des dispositifs de mesure de teneur en eau des grains, dans les publications du Prairie Agricultural Machinery Institute (1981).

Couleur et odeur

L'odeur et la couleur à l'extérieur et à l'intérieur des grains dans l'échantillon permettent d'obtenir des renseignements intéressants sur son état de conservation. Des grains ternes indiquent des moisissures d'entreposage et des détériorations possibles. Des grains de section brune ou noire, avec une odeur de tabac, indiquent qu'ils ont été soumis à un échauffement d'entreposage. On peut le constater en pratiquant une coupe transversale dans les grains. Des grains de couleur noire vacuolés, généralement soudés ensemble et dégageant une odeur de brûlé, sont considérés comme «brûlés». Il suffit de quelques grains chauffés ou brûlés dans un échantillon pour entraîner un déclassement important, et donc des pertes financières. Pour les graines de canola/colza, le moyen le plus rapide de détecter un échauffement est d'écraser les graines. Le test de l'écrasement (Conseil canadien du canola, 1974) consiste à placer 100 graines sur du ruban à masquer, à les écraser une fois avec un rouleau dur, puis à compter le nombre de graines de couleur brun foncé. De cette façon, on peut aussi évaluer le nombre de graines immatures de couleur verte ou de graines mûres, de couleur jaune. Le nombre de graines vertes dans un échantillon indique que la récolte n'est pas mûre et que la teneur en eau élevée risque d'entraîner des problèmes d'échauffement en cours de conservation.

Moisissures, germination des graines

Des graines viables disposées sur du papier filtre mouillé avec de l'eau pendant 7 jours et exposées à la lumière produisent des pousses vertes. À la surface, des graines peuvent présenter des moisissures de couleur variée. S'il n'y a pas de pousses de germination, l'échantillon est probablement assez âgé et les germes sont probablement détruits par des moisissures d'entreposage. Des grains désinfectés en surface ou stérilisés, étalés sur du papier filtre mouillé ou de l'agar-agar (une substance gélatineuse) contenant du sel (NaCl) peuvent présenter à leur surface des moisissures d'après récolte de couleur blanche, jaune, orange, verte ou bleue. Un nombre abondant de ces moisissures est un signe de détérioration et d'échauffement possibles. En étalant des échantillons provenant d'emplacements choisis dans un silo, il est possible de détecter dès leur début des détériorations qui, autrement, risqueraient de se propager; de cette manière, on peut également apprendre les détails antérieurs de l'entreposage et prévoir les futures conditions de conservation. La présence des champignons *Monascus* sp. et *Paecilomyces varioti* sur des grains traités à l'acide indique que certains traitements chimiques commencent à perdre leur efficacité (Tuite et Foster, 1979). Pour de plus amples détails sur la détection des moisissures dans les aliments voir King et coll. (1986).

Insectes, acariens

La présence d'insectes et d'acariens dans des échantillons de grains entreposés peut être décelée en 16 h au moyen d'un entonnoir de Berlese. Il s'agit d'un entonnoir métallique muni d'un grillage à sa partie inférieure dans lequel on verse 150 g de grains. Une ampoule électrique de 30 watts placée juste au-dessus de la surface du grain conduit les insectes et les acariens du grain dans une bouteille d'alcool à 70 % qui est un conservateur des organismes. Cette méthode ne permet pas de détecter les stades des insectes qui vivent à l'intérieur des grains.

Une méthode plus rapide pour détecter les acariens et certains insectes consiste à placer le grain sur un tamis et à le secouer. Les insectes peuvent alors être détectés visuellement tandis que les acariens, à peine visibles à l'oeil nu, passent à travers le tamis et peuvent être recueillis sur le plateau inférieur, puis examinés au microscope.

Modifications physiologiques

En cours de détérioration, les grains subissent des modifications physiologiques dont certaines sont facilement détectables, et indiquent des modifications qui se produisent en cours d'entreposage. La teneur en acides gras permet de mesurer les modifications chimiques sans détériorer les grains. Cette méthode consiste à broyer un poids connu de grains, à les extraire dans un solvant (éther de pétrole) pendant 16 h, et à les titrer au moyen d'une solution d'hydroxyde de potassium étalonnée. Plus la teneur en acides gras est élevée et plus élevé est le niveau de détérioration. La conductibilité électrique permet de mesurer l'état des membranes cellulaires des grains. La mesure consiste à tremper les grains dans de l'eau désionisée pendant 80 min, puis à mesurer la conductibilité du liquide de lixiviation au moyen d'un appareil à mesurer la conductibilité. Des niveaux de conductibilité élevés, qui indiquent un certain degré de rupture des cellules membranaires à l'intérieur des grains, sont également associés à une détérioration des grains (Mills et Chong, 1977).

Chapitre 6 Lutte contre la détérioration et l'échauffement

Cette lutte comporte quatre étapes principales : une planification préliminaire, la détermination du problème, la façon de le traiter et de le résoudre, et, en cas d'échec, la récupération. L'accent est mis sur l'étendue et la nature du problème et les mesures appropriées qui doivent ensuite être prises.

PLANIFICATION PRÉLIMINAIRE

Lorsque c'est possible, consulter le chef du service local d'incendie, pour la conception ou la modification des équipements de prévention et de lutte contre l'incendie, ainsi que leur entretien, comme l'emplacement des conduites d'eau, de l'éclairage d'urgence et des sorties de secours. Le chef du service d'incendie doit bien connaître les installations et doit être invité à participer à des exercices d'incendie. Dans les installations, le personnel doit être équipé d'émetteurs-récepteurs et être formé au traitement des problèmes de détérioration et d'échauffement. Il doit également être informé des possibilités de danger.

DÉTERMINATION DU PROBLÈME

Dès que l'on soupçonne une possibilité de détérioration ou d'échauffement, on a tendance à réagir immédiatement, ce qui conduit souvent à des mesures inappropriées. On doit éviter cette réaction spontanée puisque, avant de pouvoir prendre les meilleures mesures de lutte, il faut avoir répondu à certaines questions-clés : la nature et l'étendue du problème, le produit en cause, la répartition de la température, les équipements et le personnel disponibles. En mer, il faut obtenir des conseils grâce à la liaison par radio et savoir si les ports proches ont des équipements de lutte contre les incendies. On doit trouver des réponses aux questions suivantes :

- De quelle nature est le problème? S'il s'agit de détérioration, elle sera probablement circonscrite à une partie des stocks. Si c'est de l'échauffement, le problème est peut-être plus grave car un incendie menaçant les stocks — en tout ou en partie — et les installations, pourrait éclater.

- Quelle est l'étendue du problème? La meilleure façon de la déterminer est de sonder les stocks avec un thermomètre ou un thermocouple pour établir le profil de la répartition de la température. ***Il ne faut à aucun prix ouvrir rapidement la masse de grain ou le contenu du silo pour rechercher la source de l'échauffement ou la détérioration, car l'exposition à l'air d'un feu qui couve dans le grain peut causer l'inflammation presque instantanée de toute la masse*** (Bowen, 1982). Si la température à l'intérieur de la masse de grains dépasse de 10 à 15 °C la température ambiante, il existe une dangereuse possibilité d'échauffement. Dans la mesure du possible, il faut établir un profil thermographique de la matière entreposée (Rispin, 1978). Si la température à l'intérieur de la masse de grains est inférieure de 10 à 15 °C à la température ambiante, il faut examiner en profondeur le contenu du silo avec une sonde de prélèvement et vérifier à l'oeil et à l'odeur une éventuelle détérioration.

- Quels sont les produits en cause et sous quelle forme sont-ils? Il est important de savoir si les produits atteints sont des céréales, des graines oléagineuses ou des granulés, s'ils sont en sacs ou en vrac car, ces facteurs ont une incidence sur les mesures de lutte.

- Quelles sont les disponibilités en personnel et en installations? Après avoir prévenu le chef du service local d'incendie, identifier le personnel sur les lieux et l'informer du problème, et rappeler le personnel en congé. Faire un inventaire rapide des cellules vides disponibles, des camions à parois de métal ou des zones pavées qui pourront être utilisées pour le transfert des produits.

TRAITEMENT ET ÉLIMINATION DU PROBLÈME

Le résumé qui suit est un compte rendu de méthodes utilisées ailleurs pour traiter et éliminer les problèmes de détérioration et d'échauffement dans les produits entreposés en tas, à l'intérieur ou à l'extérieur, dans des cellules de ferme, des silos verticaux à grains ou à fourrage, ou dans des bateaux ou des installations portuaires, ou même qui peuvent survenir dans des machines comme des séchoirs ou des convoyeurs (tableaux 7 et 8). ***Il faut insister sur le fait que les méthodes décrites sont des lignes de conduite et non des instructions précises à suivre, lorsqu'il faut traiter un problème. La raison en est que chaque situation de détérioration et d'échauffement est unique avec ses propres facteurs qui peuvent changer d'un cas à l'autre et que les risques pour les humains et les conséquences financières sont élevés.*** Il est instamment recommandé de solliciter l'avis et les services d'un ingénieur en sécurité, qui saura aborder les problèmes de détérioration et d'échauffement, particulièrement complexes lorsqu'il s'agit de matières ensilées.

PROBLÈMES DE DÉTÉRIORATION

On retrouve de nombreux champignons et autres spores dans les grains et les produits à base de grain détériorés. Pendant la manipulation, il faut porter un masque, prendre une pause tous les quarts d'heure à l'air frais et mettre en marche une ventilation

Tableau 7 Méthodes de lutte contre la détérioration des denrées entreposées

Type d'entreposage	Emplacement et type de détérioration	Méthodes à employer
Tas à l'extérieur	Croûte supérieure, centre du tas	Porter un masque*. Séparer les matières à la pelle, brûler ou enterrer.
Silos de ferme à ouverture sur le dessus Silos de ferme à revêtement de polyéthylène	À moins de 15 cm de la paroi	Idem
Silos de ferme	Autour des portes, sur les planchers des cellules presque vides, sous l'orifice de ventilation du toit, sous des trous dans le toit	Idem
Silos de ferme	Dans la masse inférieure (à la suite d'inondations)	Porter un masque*. Sonder pour chercher la croûte, enlever les bons grains qui sont au-dessus, jeter la croûte et les grains qui sont dessous.
Silos de ferme	À la surface ou tout près avec formation partielle ou complète de ponts	Suivre les bonnes méthodes de sécurité pour entrer dans la cellule**. Désagréger les matières et les évacuer par l'ouverture supérieure ou un orifice latéral découvert.
Silos de ferme et silos à grains verticaux	Dans la masse, sous forme de ponts partiels ou complets, sous forme de masse durcie; à l'intérieur de l'auget de déchargement	Suivre les bonnes méthodes de sécurité pour entrer dans la cellule**. Enlever la matière saine par le dessus au moyen d'un élévateur à grains pneumatique portatif (fig. 11). Désagréger les matières endommagées et les évacuer de la même manière. Une méthode moins satisfaisante : découper un trou dans la paroi de façon à sortir les matières.
	À l'intérieur de la masse (premier stade de détérioration).	Aérer, sécher, réensiler.
Silos à grains verticaux	À l'intérieur de la masse (premier stade de détérioration).	Mélanger en transférant dans une autre cellule; aérer, sécher, réensiler.
	Sur les parois sous la forme de matières adhérentes (adhérences)	Suivre les mesures de sécurité appropriées pour l'emploi de la sellette.*** Déloger les adhérences en prenant soin de ***travailler au-dessus du point d'obstruction*** (fig.12) ou en utilisant un dispositif de dispersion par le haut de la cellule.

(suite)

Tableau 7 Méthodes de lutte contre la détérioration des denrées entreposées (*fin*)

Type d'entreposage	Emplacement et type de détérioration	Méthodes à employer
Wagons	En masses durcies à l'intérieur des wagons	Porter un masque*. Déloger les matières agglomérées en les aspirant.
Navires et péniches (en sacs)	À la surface des sacs	Porter un masque*. Retirer les sacs, séche à l'air; évaluer la qualité.
Navires et péniches (en vrac)	Près de la surface, sous les joints de panneaux d'ouverture, sous forme de grains germés, dans les recoins	Porter un masque*. Séparer à la pelle les matières durcies et moisies; évacuer au moyen d'un élévateur à godet ou par aspiration.
	Au milieu de la cargaison sous forme de ponts partiels ou complets, à la suite d'une fuite dans les joints ou d'un trou dans la coque.	Porter un masque*. Enlever le pont par aspiration sans mélanger, puis enlever les grains situés en dessous.
	Au milieu ou au fond de la cargaison à la suite d'une entrée de l'eau par les ventilateurs ou par les robinets de sécurité de fond de la cale, suivie de son déplacement vers le haut.	Porter un masque*. Au moyen d'un système de déchargement pneumatique ou mécanique, enlever les bons grains. Repérer la croûte à la sonde. Enlever et jeter les croûtes ainsi que les grains détériorés qui sont dessous.

* Double masque à poussière; pause toutes les 15 minutes.

** Appareil respiratoire à réservoir, ceinture de sécurité et corde, deux travailleurs prêts à intervenir.

*** Appareil respiratoire à réservoir, ceinture de sécurité, deux travailleurs prêts à intervenir, sellette au-dessus des adhérences de la paroi.

croisée. On doit s'assurer d'avoir des équipements de sécurité et l'aide d'autres personnes avant d'entrer dans des cellules, des silos et des cales de bateaux pour y traiter des problèmes.

Grains en tas à l'extérieur

Plusieurs semaines après la moisson, le grain est souvent encore empilé en tas importants sur le sol, sans protection. Il peut se développer sur le dessus une croûte de grains moisis qui germent et la détérioration se développe à l'intérieur de la masse (Mills et Wallace, 1979). Il faut d'abord séparer la croûte externe et toute agglomération de grains moisis de ceux qui ne le sont pas et ensuite, il faut la brûler ou l'enterrer. Si cela est nécessaire, sécher le reste de la masse ou la refroidir dans un réservoir, jusqu'à ce qu'il y ait un séchoir de libre.

Le grain entreposé dans des cellules provisoires s'ouvrant sur le dessus ou recouvertes de polyéthylène est plus porté à se détériorer que lorsqu'il est stocké dans des cellules en métal. La plupart des points chauds (et de détérioration) se forment en colonnes à moins de 15 cm des parois dans les deux types de cellules, et particulièrement en été, dans celles recouvertes de polyéthylène. La détérioration était probablement causée par l'eau coulant le long du cône de grains et pénétrant par les dépressions dans le grain ou des petits trous dans le plastique. Séparer avec une pelle le grain endommagé du grain sain (Muir et coll., 1973).

Cellules de ferme

Le traitement des problèmes de détérioration à l'intérieur des silos de ferme doit être soigneusement examiné. Déterminer visuellement et par sondage l'endroit et l'étendue de la détérioration, pour être certain que les meilleures techniques de traitement seront utilisées. Supprimer la détérioration dès le début en transvasant le produit dans une autre cellule, et en aérant de façon continue, jusqu'à ce que le front de température soit bien réparti à travers le grain, ou bien en séchant et en réensilant. Dans le cas de détérioration avancée, choisir des mesures de correction qui réduisent le risque de mélanger des grains détériorés et des grains sains, ainsi que des dommages à la cellule et aux structures voisines. Enlever les grains endommagés autour des portes, séparer les matières endommagées des matières saines sous les orifices de ventilation des toits ou les trous des toits, puis s'en débarrasser. Si les grains endommagés forment un pont ou une surface plus grande dans une cellule, ou à l'intérieur des systèmes d'auget, enlever graduellement le grain en bon état jusqu'à la zone endommagée. Enlever cette dernière par aspiration, à l'aide d'un élévateur à

grain pneumatique portatif (fig. 11), en creusant et en sortant au moyen d'un treuil par une ouverture de la partie supérieure, en découpant un ou plusieurs trous sur les côtés, ou en enlevant une tôle de la paroi. ***On doit cependant prendre des précautions extrêmes lorsqu'on enlève les grains autour des augets bloqués, car les effets des différences de pression qui se créent peuvent causer l'effondrement d'une ou de plusieurs cellules et des transporteurs voisins.*** Si la détérioration est très importante et que les grains sont agglutinés par des champignons de moisissure, utiliser des pioches, des marteaux-piqueurs, et même des motoculteurs pour les casser. Enlever par le dessus les matières endommagées; il est possible d'enlever le contenu d'une cellule endommagée par le dessous, au moyen d'une chargeuse frontale à travers la paroi de la cellule.



Figure 11 Élévateur pneumatique portatif destiné à déplacer le grain et les produits de grains.

Cellules inondées

Déterminer le niveau maximum atteint par l'eau, qui est généralement visible par les marques que laissent les débris sur la paroi extérieure de la cellule ou sur les bâtiments voisins, une fois que l'eau s'est retirée. À l'intérieur de la cellule, à ce même niveau, il y aura une couche de grains germés et moisis. Sauver les grains qui sont au-dessus de la couche germée avant que les odeurs de détérioration la traversent. Sécher les grains au-dessus de la couche germée sur une hauteur de 5 à 30 cm. Enterrer ou brûler les grains germés, moisis et détrempés (Mills et Abramson, 1981).

Silos à grains verticaux

Comme dans le cas des cellules de stockage à la ferme, traiter les premiers stades de la détérioration en transférant le produit dans une autre cellule, en aérant ou en séchant, et en réensilant. La détérioration avancée est plus difficile à traiter et à maîtriser, car le grain peut être aggloméré en une masse solide, par exemple si l'on ajoute un chargement humide dans un silo de grains secs. Lorsque ceci se produit dans la partie la plus basse d'un silo, ou en déchargeant, les augets sont bloqués par la masse de grains agglomérés. Enlever le produit non souillé par le haut, soit par aspiration, soit en sortant le produit au moyen d'un treuil ou au moyen d'un orifice pratiqué dans la partie supérieure de la paroi. Briser le produit souillé et l'enlever de la même façon. Déloger les matières adhérentes «adhérences» sur les parois supérieures de la cellule, en utilisant une sellette par le haut (fig. 12*a*). Une autre solution consiste à lancer un jet d'air comprimé de l'extérieur de la cellule (fig. 12*b*). Il faut être très prudent lorsqu'on utilise la sellette, car on a déjà vu des matières délogées enterrer rapidement des personnes qui travaillaient à des niveaux inférieurs à l'obstruction.

Wagons

On a observé de la détérioration dans des wagons-trémies après que la pluie eut pénétré par les panneaux ouverts avant le chargement, et dans des wagons contenant des graines à haute teneur en eau, que l'on avait égarés alors qu'ils étaient en route pour des installations commerciales de séchage. En hiver, la détérioration se produit dans des wagons contenant des matières fraîchement granulées qui ont gardé trop de chaleur résiduelle, ce qui conduit à une adsorption d'humidité et à une croissance de la moisissure qui rendent le déchargement impossible. Dans ce cas, déloger la matière détériorée, soit en creusant, soit avec des jets d'air comprimé, puis décharger par l'ouverture du haut. Il faut bien vérifier s'il y a des gaz nocifs et une déficience en oxygène. Il faut travailler à deux, en prenant les mesures de sécurité appropriées (Conseil national de la sécurité, 1962).

Navires et péniches

La détérioration se produit aussi bien en surface qu'en profondeur dans les cales des cargos, des transporteurs de vrac (fig. 13*a*,*b*) et des péniches en transit (Christensen et Kaufmann, 1978). La détérioration peut se produire à cause de grains qui commencent à moisir, de mélanges imparfaits, d'un taux d'humidité trop élevé, de la condensation (Knight, 1985) ou d'autres raisons. Avant de décharger, enlever à la pelle les grains germés ou agglutinés en surface ainsi que les grains détériorés dans les zones plus profondes en forme de triangle, dans les coins, sous les articulations des écoutilles. Dans les cargos qui transportent des matières ensachées, surtout lorsqu'ils passent

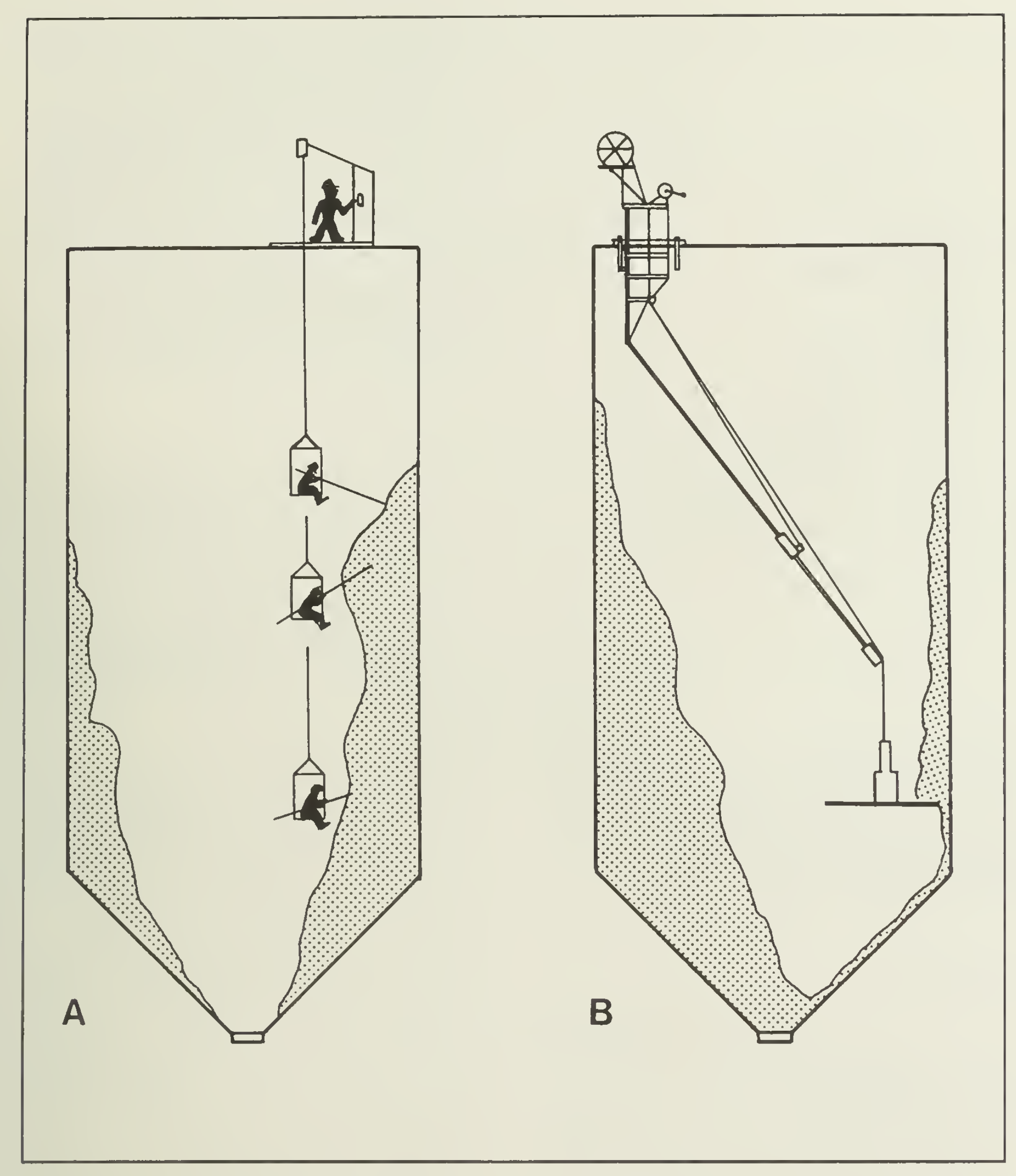


Figure 12 Suppression des adhérences aux parois des cellules : *A*, au moyen d'une sellette, (noter la position de travail dans la partie supérieure qui est recommandée, et par contre la position de travail en position inférieure extrêmement dangereuse (d'après Boumans, 1985); *B*, au moyen d'un dispositif à dispersion télécommandée (Northern Vibrator Manufacturing Co., Georgetown, Ont.).

d'un climat froid à un climat chaud, il peut se produire sur les sacs de la condensation et un début de moisissure. Il faut décharger, sécher et évaluer le contenu des sacs touchés pour déterminer si leur qualité permet une utilisation finale.

Dans les navires de haute mer, une détérioration importante peut se produire, si l'eau s'infiltre par des joints de soudure ou un trou dans la coque, ou encore par les systèmes de ventilation et autres ouvertures du pont (fig. 13*a*). Dans chacun de ces cas, l'eau monte jusqu'à un certain niveau au-dessus duquel on doit décharger les grains secs par aspiration ou mécaniquement. La quantité d'eau dans la cale, son emplacement et le temps pendant lequel le grain a été exposé à l'humidité permettent de déterminer si le grain au-dessous du niveau doit être sauvé ou rejeté (tableau 7). La détérioration importante qui se produit à bord des navires de lac provient plus souvent de fuites par les valves de fonds de cale que de fuites par les joints ou les trous dans la coque, car la cale du cargo est séparée du bordé de la coque par un double fond et des réservoirs latéraux (H. Uustalu, communication personnelle, 1986).

Pour ce qui est de la détérioration en cours de navigation, elle ne peut être évitée, qu'on utilise ou non les systèmes de ventilation à bord pendant le voyage, si le produit est trop humide ou trop chaud au moment de l'embarquement (Milton et Jarrett, 1970). La ventilation en surface de la cargaison de vrac par les systèmes de ventilation du pont est inefficace contre la détérioration profonde; elle est d'une utilité douteuse pour éliminer la détérioration de surface, et elle peut aggraver la détérioration si l'humidité relative de l'air dépasse 80 % et si la température de l'air dépasse 25 °C (Christensen et Kaufmann, 1978). La meilleure façon de lutter, c'est la prévention. Idéalement, il faut sécher les chargements jusqu'aux limites sécuritaires d'humidité pour éviter la détérioration pendant le transport surtout quand il s'agit de longs voyages (Milton et Jarrett, 1970). La proportion de grains brisés affecte le taux de détérioration du maïs et doit être réduite au minimum par une manipulation prudente (Paulsen et Hill, 1977). Pour de plus amples détails sur les effets de la condensation et sur les dommages causés par les moisissures, les insectes et les acariens dans les cargos ayant ou non des conteneurs, voir Knight (1985).

PROBLÈMES D'ÉCHAUFFEMENT ET D'INCENDIE

On doit être entrêmement prudent lorsqu'on veut régler et traiter des problèmes d'échauffement dans des denrées entreposées, car, si l'on fait une erreur, il y a risque d'incendie et d'explosion. Il faut généralement éviter de remuer les matières échauffées avec de l'eau sous pression ou la mousse sous pression, car on risque une explosion de poussière. Dans chaque cas, un examen sur place doit être fait par un ingénieur en sécurité de l'endroit et par des pompiers spécialisés, qui détermineront la meilleure façon de régler le problème. Le tableau 8 donne un résumé des méthodes utilisées pour régler les problèmes d'échauffement dans divers silos d'entreposage.

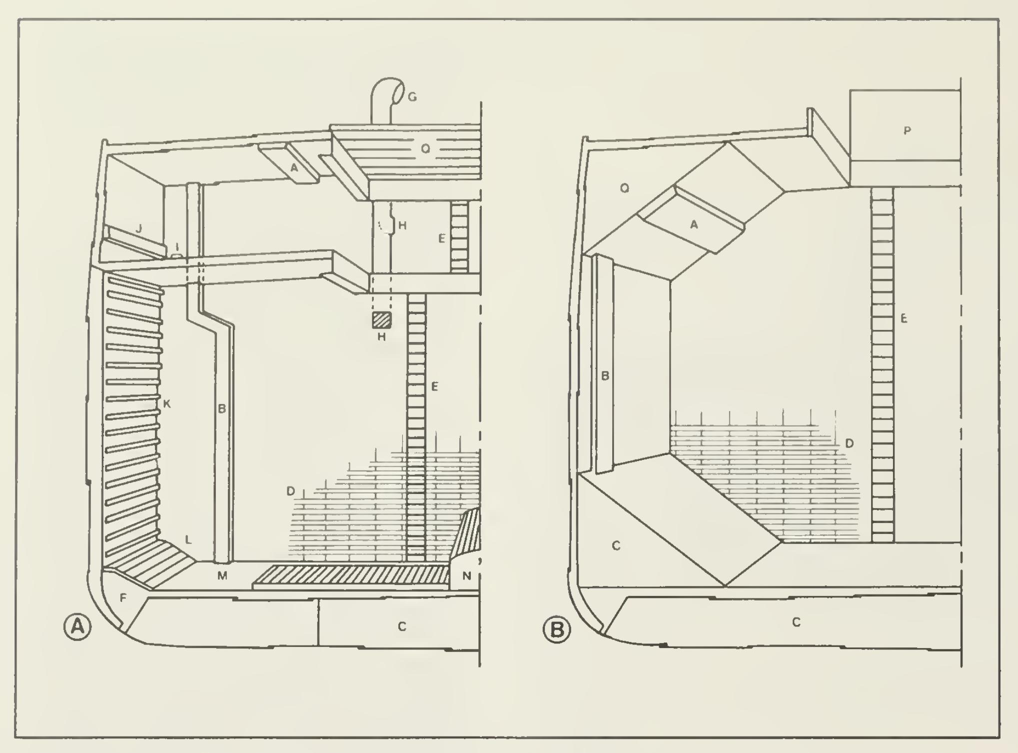


Figure 13 **Section médiane de *A*, cargo et *B*, navire de transport en vrac : *A*, coffre électrique; *B*, protection de tuyauterie; *C*, réservoir de carburant; *D*, cloison de bois; *E*, échelle; *F*, bouchain ou fond de cale; *G*, ventilateur; *H*, grille de ventilateur; *I*, écoutille d'arrimage; *J*, coffret de dégaussage; *K*, vaigrages à claire-voie; *L*, paracloses; *M*, plafonds de bois sur support; *N*, tunnel de l'arbre d'hélice; *O*, réservoir latéral; *P*, écoutille de McGregor (ouverte); et *Q*, écoutille (fermée) (d'après Monro, 1969).**

Stockage des grains en tas à l'extérieur

Lorsqu'elles sont exposées à la pluie pendant 2 ou 3 mois, les céréales entassées peuvent s'échauffer. À cause de la respiration des grains, il existe davantage de risque d'échauffement dans les tas de grains fraîchement moissonnés, de plus de 1000 t. Cette situation est aggravée par le développement à la surface d'une couche de germes qui bloque la circulation d'air et favorise l'échauffement. Tout d'abord, il faut découvrir l'emplacement de la zone échauffée à l'intérieur du tas et en prendre la température qui sera probablement de l'ordre de 30 à 60 °C. Enlever et rejeter la croûte, puis enlever la matière échauffée avec un système à godet et la faire refroidir en couche de 30 cm sur une surface bétonnée. Lorsque la matière est refroidie, l'assécher et l'ensiler, ou la remettre en tas plus petits jusqu'à la vente.

Stockage des grains en tas à l'intérieur

Dans les granulés entassés dans les magasins, il peut se produire un échauffement et un feu qui couve (1) par suite d'addition accidentelle d'eau, soit à la suite d'inondation ou par des fissures au toit (2), il se peut aussi qu'une partie du stock soit plus chaude qu'il ne le faut, à cause d'un refroidissement inapproprié ou (3) parce que le stock contient des fragments métalliques chauffés pendant le traitement. L'échauffement des granulés est aggravé par des graisses animales, des graines oléagineuses ou des contaminants inflammables, dans les granulés ou sur le sol, et un tas échauffé, lorsqu'il est remué, peut s'enflammer subitement. Les tas de grains sont moins susceptibles de s'enflammer, mais ceci peut arriver quand, par exemple, on transporte accidentellement des grains brûlants à la suite d'un incendie et qu'on les incorpore au tas (Boumans, 1985). Déterminer d'abord l'emplacement de la zone d'échauffement dans le tas et sa température. Il faut éviter de déranger les matières en tas et de former ainsi des nuages de poussière qui risquent d'exploser. Enlever les matières non touchées, puis celles qui sont échauffées, avec un système à godet. Sortir les matières échauffées du bâtiment et les mettre en couche de 30 cm pour les refroidir. Il est déconseillé d'arroser les grains échauffés avec de l'eau (voir le paragraphe suivant).

Silos

Le traitement des problèmes d'échauffement des grains et du fourrage dans les silos verticaux est décrit par Campbell (1973), par la National Fire Protection Association (1968) et par le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (1986); les avis divergent parfois.

Selon le NIOSH (1986), la façon la plus efficace de combattre le feu dans un silo, c'est d'y injecter du dioxyde de carbone ou de l'azote. On ne doit pas diriger des jets d'eau ou de mousse sur le feu par les ouvertures supérieures du silo parce que de l'oxygène peut entrer dans le silo et provoquer la formation d'une poussière explosive en suspension (NIOSH, 1985). Pour de plus amples détails, voir la section sur les silos verticaux et Murphy et Arble (1982). Le NIOSH (1986) recommande des silos à limitation d'oxygène mais cette recommandation peut s'appliquer à d'autres types de silos. Si vous avez des doutes, consultez un expert.

Il y a quelques années, on a découvert que l'explosion d'un silo terminal de Thunder Bay, Ont., avait été causé par la formation de «gaz de houille», après qu'on eut mis de l'eau dans le silo.

Cellules de fermes et silos à grains verticaux

Les incendies se produisent lorsqu'on aère les matières qui sont à un stade avancé d'échauffement biologique et chimique; lorsque les granulés sont ensilés en même temps que des morceaux de matières agglomérées en fusion ou

Tableau 8 Méthodes de lutte contre l'échauffement et le feu dans les denrées entreposées

Type d'entreposage	Nature de l'échauffement	Méthodes à employer
Tas à l'extérieur	Échauffement ou combustion lente	Localiser le problème au moyen d'une sonde à thermomètre; enlever la croûte et les matières échauffées; refroidir.
Tas à l'intérieur	Idem	Comme ci-dessus, ne pas faire trop de poussières; transporter à l'extérieur des bâtiments au moyen d'un godet-tracteur; refroidir.
Cellule de ferme ou silos à grains verticaux	Échauffement	Localiser la région du problème au moyen d'une sonde thermométrique; si la température est inférieure à 50 °C, retourner ou aérer les stocks pour les refroidir; si ***l'échauffement est important, ne pas aérer à cause du risque d'inflammation.***
Silos à grains verticaux	Combustion lente dans les aliments moulus pour le bétail, les granulés ou les grains entiers	Ne pas projeter d'eau ni de mousse sous pression à cause des risques d'explosion de poussières; porter un masque*. Fermer hermétiquement les ouvertures de façon à diminuer l'apport d'oxygène; purger soigneusement le contenu avec du N_2 ou du CO_2; mesurer la teneur en oxygène de l'atmosphère du silo et des espaces de travail et lorsque ce niveau est inférieur à 10 %, enlever le chargement. Lorsque les grains sont refroidis, pratiquer un trou à la base du mur afin d'évacuer les matières.
Élévateurs à grains en bois	Feu avec flammes	Comme on ne peut généralement pas sauver les bâtiments, il faut arroser avec de l'eau, à distance de sécurité pour réduire les flammes. Ne pas arroser le grain, pour éviter sa détérioration. Sauver ce qui peut se déplacer, par exemple, les registres de comptabilité. Éviter de déplacer les matières en utilisant de l'eau ou de la mousse sous pression. Utiliser seulement une pompe manuelle dans l'élévateur.
Silos de fourrage vertical (déchargement par le dessous et le dessus)	Feu de combustion lente	Ne pas utiliser d'eau ou de mousse pour éteindre le feu par les panneaux d'ouvertures du toit; installer des affiches pour avertir les pompiers du danger d'explosion; ne pas fermer les panneaux d'ouvertures du toit s'il y a de la fumée ou de la vapeur qui en sort ou si le silo vibre; fermer mais ne pas verrouiller les panneaux d'ouvertures si le silo ne vibre pas et s'il n'y a pas de fumée ou de vapeur qui en sort pendant plusieurs heures; projeter du CO_2 sur du N_2 liquide dans le silo, en prenant les précautions de sécurité contre les gaz pour éteindre le feu. Voir les méthodes décrites par Murphy et Arble (1982) et par NIOSH (1986).

(suite)

Tableau 8 Méthodes de lutte contre l'échauffement et le feu dans les denrées entreposées (*fin*)

Type d'entreposage	Nature de l'échauffement	Méthodes à employer
Incendie de séchoir	Feu avec flammes	Fermer le chauffage et le ventilateur; si nécessaire éteindre avec de l'eau.
Conteneurs	Feu de combustion lente	Voir les méthodes décrites par R.J. Brady et coll. (1979) et Nicholls (1984) et le chapitre 6 de ce livre.
Navires ou péniches	Feu de combustion lente et avec flammes	Pour les détails sur l'utilisation du CO_2, de l'eau et des autres moyens de lutte, voir R.J. Brady et coll. (1979), Reanney (1969), Rushbrook (1979) et Taylor et Pucill (1982).

*Exige l'utilisation d'un appareil respiratoire à réservoir, des ceintures de sécurité, des câbles et deux personnes prêtes à intervenir.

des fragments métalliques chauds; ou encore, lorsqu'on ajoute dans des cellules contenant des matières non échauffées, des matières fumantes ou très chaudes, qui proviennent d'un incendie ailleurs dans l'installation. Les méthodes suivantes ont été utilisées pour combattre les feux qui couvent.

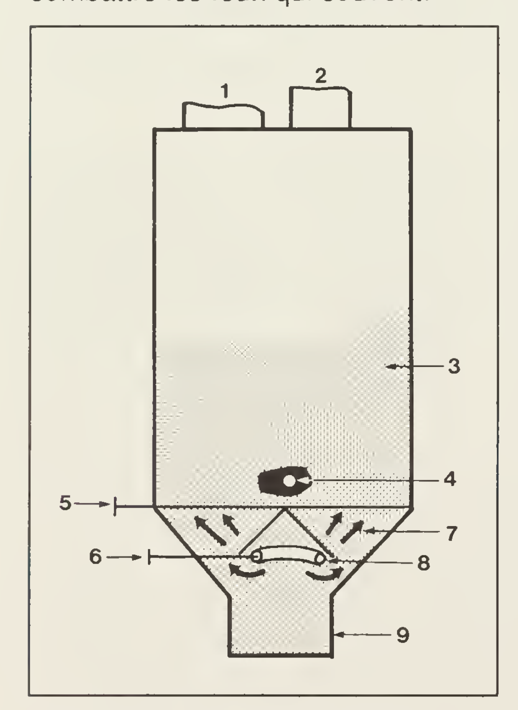


Figure 14 Purge à l'azote d'un feu couvant dans un silo de minoterie contenant 80 t de fourrage : (*1*), glissière d'entrée; (*2*), filtre avec batteur; (*3*), farine pour alimentation du bétail; (*4*), poche de feu couvant sans flammes; (*5*), levier destiné à retirer le capot de sécurité; (*6*), raccord de tuyauterie destiné à l'entrée de N_2; (*7*), N_2; (*8*) canal circulaire avec perforations; (*9*), sortie (d'après Dinglinger, 1981).

Azote (N_2) Dinglinger (1981) décrit (en allemand) un incendie important en Allemagne de l'Ouest qui avait éclaté dans un silo de granulés, et qui avait été maîtrisé avec succès au bout de 10 jours au moyen de 18 000 m³ de gaz N_2 (fig. 14). Dinglinger déclare que, si l'on découvre un feu qui couve dans un silo contenant des granulés ou autres denrées à gros grains pour animaux, le feu sera alimenté en air frais par la chaleur des gaz qui créent un effet de cheminée. En fin de compte, les gaz se condensent et les produits en se collant peuvent former un pont près de la source de l'incendie. Dans ce cas, si l'on vide rapidement le silo sans le purger au préalable avec du N_2 ou un autre gaz approprié, le pont peut s'effondrer et la poussière ainsi soulevée peut s'enflammer. On recommande les mesures suivantes en cas d'incendie dans un silo :

- Fermer hermétiquement, aussi rapidement que possible, les ouvertures à la base et au plancher du silo, ainsi que les fissures le long des joints. Ceci évitera, ou du moins ralentira, l'alimentation en oxygène frais. Il se peut même qu'on évite la formation de ponts.
- Purger les gaz qui sont dans les cavités du silo au moyen d'un gaz inerte. C'est une bonne initiative d'installer, à titre préventif, des bouches à cet effet, à la base et sur le plancher du silo.
- En même temps, surveiller l'atmosphère dans le silo et dans les salles adjacentes.
- Lorsque l'atmosphère dans le silo est telle que l'inflammation n'est plus possible (que 10 % de O_2), on peut commencer à dégager.

Dioxyde de carbone (CO_2) Boumans (1985) décrit des moyens d'utiliser le CO_2 pour lutter contre les feux sans fumée ni flamme qui couvent dans les silos. Après fermeture étanche du silo, on applique du CO_2 sous forme de gaz à raison d'environ 1 kg de CO_2 par m³ de contenance du silo. Un robinet est fixé à l'entrée du silo pour permettre au CO_2 de pénétrer sous pression. Des précautions particulières doivent être prises pendant l'application de ce procédé, afin d'éviter des risques de suffocation. À intervalles de quelques heures, on ajoute périodiquement du CO_2, afin de maintenir le niveau de gaz voulu au sommet du chargement. Harvestore Products® (1982) donne le détail des instructions à suivre pour utiliser le CO_2 dans la lutte contre les feux qui surviennent dans les silos à limitation d'oxygène du modèle Harvestore®.

Autres modèles

Dans le cas des silos ayant des parois donnant sur l'extérieur, on découpe un trou dans cette paroi au-dessus de la zone du feu, de façon à retirer les matières intactes, que l'on fait s'écouler très lentement dans des camions ou sur le sol. L'inconvénient avec la dernière de ces deux méthodes, c'est qu'elle risque de gêner d'autres opérations

au niveau du sol. Meeker (1979) a éteint un feu dans un silo contenant des graines de soja en découpant un trou dans la région supérieure, de façon à retirer les matières intactes et un autre trou dans la partie inférieure pour en extraire les matières en combustion. Pour décharger, il vaut mieux ne pas utiliser le transporteur habituel. Dans le cas des cellules de stockage intermédiaire, on doit installer un transporteur à vis provisoirement fermé allant directement de la goulette de sortie vers l'extérieur et décharger le silo dans une atmosphère inerte en introduisant continuellement du CO_2 dans le transporteur, ou mieux, au bas de la trémie près de l'orifice de sortie (Boumans, 1985).

Il ne faut jamais entreposer des matières déchargées qui contiennent (ou ont contenu) des blocs de matières chauffées et soudées entre elles sans observer une longue période de refroidissement en couches minces et sous surveillance étroite. Ce point est particulièrement important lorsqu'il s'agit de structures en bois. Même lorsque des blocs importants sont retirés par criblage, de petites portions de matières brûlantes peuvent rester, risquant de causer des feux ou des explosions en cours de traitement et d'entreposage.

Silos de fourrage verticaux

De nombreux feux, et occasionnellement des explosions, se sont produits aux États-Unis dans des silos verticaux contenant de l'herbe ou du foin entreposés (Koegel et Bruhn, 1971; Campbell, 1973; NIOSH, 1986). Singley (1968) décrit la succession des événements qui ont conduit à une explosion au cours du déchargement par le bas d'un silo de 6 m sur 18 m, contenant du seigle et de la luzerne de première coupe à haute teneur en eau. Quatre jours avant l'explosion qui a soulevé le toit de béton qui pesait 15 t, des panneaux du toit et la porte de déchargement de la base avaient été laissés ouverts en vue de recevoir un nouveau chargement de foin, ce qui avait créé un effet de cheminée à l'intérieur du silo. Au moins 2 jours avant l'explosion, on avait observé que le foin livré par le déchargeur était passablement brûlé, ce qui entraîna la production de gaz inflammables, jusqu'au moment où le point d'inflammation du foin humide fut atteint. On parvint à éteindre le feu en y versant 9 000 L d'eau. Remarque : il est dangereux d'employer de l'eau pour éteindre les feux de silos (voir paragraphe suivant).

Le 27 août 1985, aux États-Unis, trois pompiers ont trouvé la mort quand l'incendie d'un silo à limitation d'oxygène a explosé. Les pompiers étaient en train d'arroser le foyer d'incendie par le haut du silo lorsqu'une explosion a soufflé le toit de béton du silo entraînant les pompiers dans une chute fatale. La cause de l'explosion était soit une accumulation de gaz combustibles d'une combustion incomplète ou soit une explosion de poussière ou un mélange des deux. Le fait d'ouvrir les portes du toit pour arroser peut avoir augmenter le niveau d'oxygène et créer ainsi une atmosphère explosive. Le courant d'air produit par le jet d'eau peut aussi avoir provoqué l'explosion. De plus, le giclement de l'eau peut avoir causé une suspension de la poussière et ainsi augmenté le danger d'explosion. Parce qu'on n'a pas employé des méthodes appropriées pour combattre l'incendie, parce qu'il y a eu des manques lors de l'opération elle-même et dans les méthodes d'entretien dans ce cas précis, le National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) a publié cette mise en garde et les recommandations qui suivent (NIOSH, 1986).

Les Services de lutte contre les incendies tiennent à préciser que diriger de l'eau ou de la mousse sur un feu par les portes du toit d'un silo à limitation d'oxygène peut provoquer une explosion à l'intérieur du silo.

Voici les recommandations de prévention des incendies et des explosions dans des silos à limitation d'oxygène :

- ***Garder les portes fermées*** sauf pour le chargement et le déchargement des silos. Si le silo est bien scellé, la quantité d'oxygène emprisonné à l'intérieur est habituellement insuffisante pour entretenir l'incendie par auto-combustion.
- Bien entretenir le silo en suivant minutieusement les instructions du fabricant pour que le silo garde ses propriétés de limitation d'oxygène.
- La teneur en humidité du fourrage ensilé doit être contrôlée tout comme le type de coupe du fourrage. On doit respecter les taux de remplissage recommandés par le fabricant afin de réduire les possibilités d'auto-combustion. Murphy et Arble (1982) décrivent les éléments d'une bonne mise en silo.

Voici les recommandations de lutte contre les incendies dans les silos à limitation d'oxygène :

- ***Ne pas envoyer d'eau ou de mousse synthétique sur le feu par les ouvertures du toit*** parce que cela peut faire entrer de l'oxygène dans le silo et provoquer la suspension d'une poussière explosive.
- Placer une affiche sur le silo avertissant les pompiers qu'il s'agit d'un silo à limitation d'oxygène et fournissant les renseignements sur les techniques appropriées d'extinction.
- Ne pas ouvrir les portes du toit si de la vapeur ou de la fumée en sort ou si le silo vibre.
- S'assurer que les portes du toit ferment d'une façon sécuritaire si le silo ne vibre plus et qu'il n'y a plus de fumée ou de vapeur sortant des portes depuis plusieurs heures. ***Ne pas fermer les portes trop serré.*** Cela permettra de laisser s'échapper la pression qui pourrait s'accumuler.
- Injecter de grandes quantités de dioxyde de carbone (CO_2) ou d'azote liquide (N_2) dans le silo pour éteindre le feu. Certains silos ont des valves spéciales à cet effet. S'il est nécessaire de percer un trou dans le silo pour insérer le tube de gaz, bien prendre garde de ne pas faire

entrer de l'oxygène dans le silo. Prendre toutes les précautions nécessaires habituellement à la manutention du CO_2 et du N_2. Pour le silo de 6 m de diamètre par 18 m de haut, il faut 20 cylindres standard de CO_2 ou 40 cylindres standard d'azote liquide. Pour les silos de cylindrage différent ou des réservoirs de capacité différente, voir Murphy et Arble (1982).

- Les manufacturiers, en collaboration avec les Services d'incendie, devraient mettre sur pied un programme en vue de fournir des valves d'injection de gaz pour la lutte contre les incendies et pour tous les silos à limitation d'oxygène actuels et nouveaux.

- Certains manufacturiers, comme Harvestore® Products (1982), ont des instructions étape par étape sur la façon d'éteindre les feux de leurs silos. Les propriétaires de ferme peuvent se procurer ces instructions auprès du manufacturier.

Pour de plus amples renseignements sur les façons de combattre un incendie dans les silos à fourrage vertical et les autres, adressez-vous au National Institute for Occupational Safety and Health, 944 Chestnut Ridge Road, Morgantown, West Virginia 26505; tél. (304) 291-4595.

Séchoirs

Pour éteindre un feu qui éclate dans un séchoir, il faut fermer le chauffage et le ventilateur. Dans un séchoir à recirculation, si l'auget est laissé en état de fonctionnement, le feu peut s'éteindre de lui-même; mais il est souvent nécessaire d'utiliser de l'eau pour l'éteindre (Friesen, 1981).

Navires

La lutte contre les feux qui couvent dans des cargaisons demande un examen soigné de la situation, une somme de connaissances techniques et une équipe bien entraînée, armée d'un équipement moderne. La situation est d'autant plus difficile que le feu se produit dans une structure complexe en déplacement, fortement influencée par l'état de la mer et les conditions atmosphériques et souvent à des distances considérables de toute aide extérieure. Les facteurs qui s'appliquent sur un navire sont différents de ceux qui s'appliquent à un entrepôt sur terre et si l'on n'en tient pas suffisamment compte, on risque de perdre à la fois la cargaison et le navire. Sur un navire, chaque feu de cargaison présente une situation différente et doit être traité en conséquence. Tout d'abord la méthode à employer variera si le navire est au port ou en mer. Dans une publication de la Fire Protection Association (1986), on trouvera la description de la lutte contre un feu difficile à éteindre, probablement causé par l'auto-inflammation de fourrage mouillé, à bord d'un cargo en mer ou au port. Le lecteur pourra consulter d'excellents ouvrages sur la science de la lutte contre les incendies à bord des navires par Reanney (1969), R.J. Brady Co. (1979) et Rushbrook (1979). Dans R.J. Brady Co. (1979) et Nicholls (1984), on trouvera des détails sur la façon de combattre les feux de conteneurs sur les ponts et dans les cales des navires.

Nicholls (1984) décrit les problèmes rencontrés et les méthodes employées pour combattre des feux à bord de navires à quai à Port Elizabeth, en Afrique du Sud.

- Il est à noter que des problèmes de communication relatifs au langage et à l'emploi des termes nautiques se produisent souvent entre pompiers et équipage, ce qui complique les opérations de lutte contre l'incendie.

- De plus, comme chaque navire est différent, les pompiers ont à travailler continuellement dans des lieux qui ne leur sont pas familiers.

- Un autre problème est la nécessité de rester conscient de la stabilité du navire, ce qui restreint l'utilisation d'eau.

- À l'arrivée d'un navire, les pompiers doivent avoir les réponses aux questions suivantes :

   - qu'est-ce qui brûle? (selon toute probabilité)

   - quel est l'emplacement du feu? (selon toute probabilité)

   - quelle est l'étendue du risque que le feu se répande d'un compartiment à un autre?

   - quelles mesures a-t-on déjà prises pour lutter contre le feu?

   - quelles sont les installations fixes de protection contre le feu?

   - quelle est la nature de la cargaison? (d'après le manifeste du navire ou le plan de chargement).

Les **feux de cales ouvertes**, au début de leur développement, sont attaqués à partir de l'intérieur de la cale au moyen de jets à haute pression, ou à partir du pont au moyen de boyaux, en déplacant la cargaison et en la déposant sur le quai au moyen d'une grue, puis en la noyant d'eau. Si le feu prend de l'ampleur, les écoutilles sont rapidement refermées avant qu'elles ne se déforment sous l'action de la chaleur et l'on introduit du CO_2 au moyen des installations du navire. Les cales adjacentes sont inspectées, les cargaisons retirées des cloisons adjacentes tandis qu'on continue de décharger du CO_2.

Les **feux de cales fermées** sont reconnaissables à la fumée qui sort des ventilateurs et des écoutilles. Pour commencer, on utilise des conduites d'eau à haute pression pour abattre les flammes avant que des équipes munies d'appareils respiratoires ne pénètrent dans la cale afin de déterminer l'étendue du feu et d'inspecter les cloisons. En aucun cas, on n'ouvre les cales, sinon le feu éclaterait et entraînerait des dommages sérieux dans la cargaison et même peut-être la perte du navire. Les ventilateurs sont arrêtés et recouverts de toiles imperméables tandis que les installations du navire déchargent du CO_2 à l'intérieur de la cale. On peut encore répandre du CO_2 à l'intérieur de la cale à partir d'un navire réservoir amarré à quai, à travers un petit trou que l'on creuse dans le pont et que l'on élargit

progressivement. On descend un thermomètre à l'intérieur de la cale pour prendre les températures. Toutes les 2 heures, et même toutes les heures si la température ne diminue pas, on continue d'injecter du CO_2. On peut arroser les cloisons intérieures et les côtés du navire. Une fois qu'on a déterminé que le feu est bien éteint après une inspection au moyen d'un appareil respiratoire, on introduit par l'écoutille de sécurité quatre conduites d'eau à haute pression et l'on noie la région atteinte avant d'ouvrir l'écoutille principale. On continue d'arroser jusqu'à ce que l'on soit certain qu'il n'y a plus de gaz dans la cale. À ce moment, les dockers peuvent entrer pour décharger la cargaison.

Les **feux de conteneurs** sont difficiles à combattre à cause de la hauteur du franc bord des navires qui entraîne une difficulté d'accès et à cause de l'instabilité inhérente du navire. De plus, l'eau ne peut être utilisée en raison de ses effets sur la cargaison et aussi à cause du problème de stabilité. Quant au problème de l'accès, il a été résolu en construisant un conteneur spécial sans toit, avec un côté retiré, qui sert à transporter l'équipement et le personnel sur le pont au moyen d'une grue. L'équipement et le concentré qui produisent de la mousse à expansion moyenne sont hissés sur le pont et la mousse est appliquée à travers les écoutilles verticales des côtés. Les conteneurs arrimés sur le pont sont déchargés en même temps, pour avoir un meilleur accès par les écoutilles. Les écoutilles ouvertes, on continue l'application de mousse à partir du haut, avec les écoutilles latérales fermées. Le conteneur atteint se reconnaît généralement à la décomposition plus rapide de la mousse et à un courant d'air ascendant. Après avoir retiré les conteneurs voisins, on arrose à haute pression le conteneur endommagé, puis on le transporte sur le quai (Nicholls, 1984).

SAUVETAGE

Après l'incendie, des compagnies de sauvetage récupèrent le plus possible de marchandises des installations endommagées. Ce travail demande une expérience considérable. Les compagnies d'assurance ont recours à des compagnies de sauvetage lorsqu'elles doivent répondre à des réclamations qui exigent l'intervention de spécialistes.

Directives générales applicables aux élévateurs à grains

- À partir du moment où l'on découvre un feu dans un élévateur de grains en bois, il est généralement trop tard pour le sauver et pour sauver les produits, (fig. 18*b*). Il faut consacrer ses efforts au déplacement des wagons de chemin de fer, à la protection des provisions d'engrais et des élévateurs voisins et à la mise à l'abri des livres de compte.

- Projeter de l'eau sur le feu lui-même afin de réduire son intensité et sur les autres installations, mais pas sur le grain. Plus le grain est mouillé, plus il est difficile de le sauver, car ce grain humide doit être séparé et séché par la suite. De plus, les élévateurs contiennent souvent plus de 6 000 t de grains, mais les séchoirs ne fonctionnent qu'à environ 6 t par heure.

- Ne pas projeter d'eau à la même place pendant des heures.

Les causes des incendies qui se produisent dans les élévateurs de grains sont les suivantes, par ordre de fréquence : les *pièces mécaniques* (pièces en mouvement, roulements, pièces brûlantes qui tombent dans la poussière et autres); la *foudre* (rechercher comme indice des tiges de cuivre fondues); les *incendies criminels* (rechercher chiffons et bouteilles contenant du carburant); les *systèmes électriques* (moteur, filage, boîte d'inspection), et l'*inflammation spontanée*. Dans les élévateurs de petite taille, l'auto-inflammation est la cause la moins fréquente; elle se présente le plus souvent avec des huiles oléagineuses ou des aliments à l'usage du bétail, plutôt qu'avec des grains ordinaires. Dans des terminaux importants, il se produit plus souvent des problèmes d'échauffement, en raison du grand volume des produits entreposés, des fortes pressions, des espaces fermés et des gaz qui se forment dans les silos. La Grain Dealers Mutual Insurance Company (1961) fournit un compte rendu un peu ancien, mais encore utile sur le sauvetage des grains et des produits du grain.

Knight (1985) a écrit un livre de référence générale, à l'intention des surveillants de cargaisons, des estimateurs, des assureurs et autres personnes intéressées à l'emballage, au transport et à l'arrimage des marchandises dans le monde entier. La section consacrée à la description des principes généraux à observer lorsqu'on fait l'inspection de marchandises endommagées est d'un intérêt particulier.

INSTRUCTION ET FORMATION

Des installations d'entreposage exploitées par des responsables expérimentés et un personnel entraîné sont généralement des endroits où l'on peut travailler en toute sécurité. Cependant, en raison des risques qui existent, des personnes mal informées peuvent s'exposer et en exposer d'autres à certains dangers. Il est donc de la plus grande importance que toutes les personnes qui travaillent à plein temps ou à temps partiel pour des entrepreneurs soient parfaitement au courant des dangers qui existent dans l'installation ou dans la ferme. Une attention spéciale doit être portée aux enfants qui travaillent dans les fermes ou qui sont en visite.

Le personnel à plein temps a besoin d'une formation en équipe, afin d'être capable de traiter les problèmes courants, mais qui comportent certains risques; il doit pouvoir appliquer des directives de secours d'urgence, traiter les cas d'urgence en collaboration avec les ambulanciers et les pompiers locaux et guider le personnel à temps partiel et les entrepreneurs dans l'application des pratiques de sécurité. Les responsables doivent être au courant des plus récentes méthodes de sécurité et de toutes les nouvelles méthodes de gestion de la sécurité, et les porter à l'attention du personnel. Les responsables doivent donner des directives de sécurité très strictes au personnel et aux entrepreneurs de l'extérieur, en particulier, les soudeurs, et appliquer avec rigueur une politique de non-admission des visiteurs occasionnels, comme les mariniers qui attendent de décharger leurs navires. Plus important encore, le responsable ou le superviseur doit être personnellement avisé avant l'entrée de toute personne à l'intérieur des silos et de nouveau quand le travail est achevé et que tous les travailleurs sont à l'air libre et en sécurité (Conseil national de sécurité, 1962). Pour obtenir de plus amples détails sur la sécurité dans les élévateurs à grains et les moulins d'aliments pour les animaux, voir le National Institute for Occupational Safety and Health (1983).

Tableau 9 Causes des décès survenus dans des élévateurs, minoteries et autres installations de traitement du grain (incidents sélectionnés) (Cloé, 1983)

Type d'accidents	Nombre d'incidents	Nombre de décès
Suffocation dans le grain	32	33
Explosion/feu	18	37
Chutes	19	19
Électrocution	12	13
Effondrement de structures	7	7
Personnes prises dans des augets/convoyeurs	6	6
Personnes écrasées entre des surfaces	4	4
Vapeurs dangereuses	2	2
Personnes prises dans la machinerie	2	2
Noyades	2	2
Personnes écrasées par camions de grains	1	1
TOTAL	105*	126

* Cas sélectionnés rapportés par l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA), Washington, D.C., entre 1977 et 1981.

VÊTEMENTS DE PROTECTION

Il faut porter des vêtements ajustés de façon à éviter d'être pris dans des courroies de transmission, dans des augets ou des saillies à la surface de silos. Il faut aussi porter des bottes résistantes mais flexibles, protégeant contre l'écrasement et la pénétration. On doit disposer de différents modèles de masques et de respirateurs ainsi que de filtres de rechange. On doit les utiliser de façon régulière car la poussière des installations de traitement de grains et de fourrage risque de poser de graves problèmes de santé. Wilkins (1984) décrit les principaux modèles de respirateurs qui sont utilisés par les producteurs de bétail pour réduire l'exposition à la poussière des étables. Ne jamais entrer dans un silo qui contient du grain en mauvais état, à moins de porter un dispositif de respiration approprié, car le grain avarié risque de produire des gaz toxiques. De

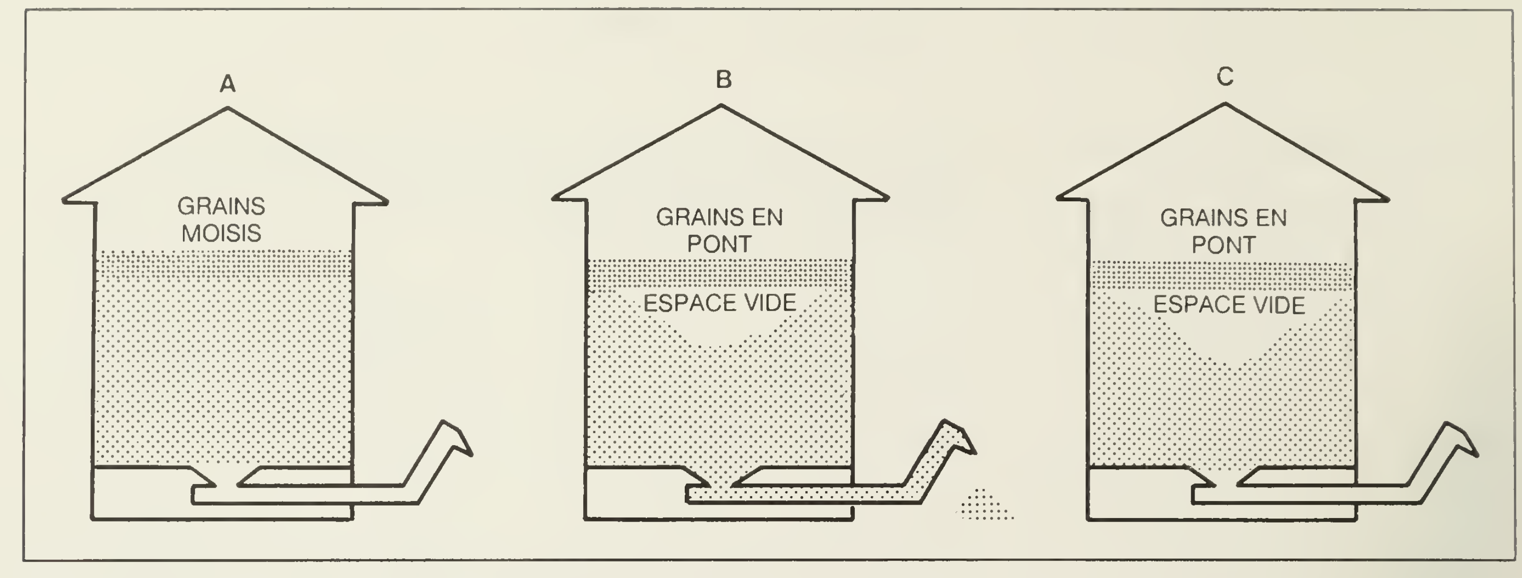


Figure 15 Risques créés par la formation de ponts : *A*, du grain moisi provoque la formation de ponts avant déchargement; *B*, un espace vide se forme à mesure que le chargement commence; *C*, l'espace vide demeure après l'arrêt du déchargement (d'après University of Kentucky, 1984).

même, il ne faut jamais pelleter du grain moisi pour le sortir d'un silo sans porter un masque et prendre de fréquents repos à l'air frais. L'exposition aux spores contenues dans le grain moisi peut avoir des effets à long terme (Manfreda et Warren, 1984). On doit se renseigner et acheter l'équipement de protection le plus récent : à long terme, c'est un achat avantageux.

DANGERS

Suffocation

Au cours des dernières années, le nombre de cas de suffocations ou asphyxies dans des silos de grains a augmenté aux États-Unis, en raison de l'accroissement de la taille des installations dans les fermes, de l'accroissement de la mécanisation et du manque de connaissances de la manutention des grains et des précautions de sécurité, ainsi que pour d'autres raisons (University of Kentucky, 1984). Cinquante-et-un cas de suffocation se sont produits dans des silos de ferme au Nebraska et en Indiana entre 1970 et 1979. Aux États-Unis, de 1979 à 1981, (tableau 9) sur 126 cas de décès survenus dans 105 incidents sélectionnés dans des installations de manutention du grain, 33 décès ont été causés par la suffocation (tableau 9) (Cloe, 1983).

Les suffocations se produisent lorsque des personnes se trouvant à l'intérieur d'un silo sont englouties par le grain qui s'écoule au cours d'une opération de déchargement par l'auget inférieur ou par des méthodes de déchargement par gravité. Certains grains comme ceux du lin ou du millet sont comme du sable mouvant et une personne risque de s'enfoncer rapidement sous son propre poids; la situation est encore pire avec des produits en écoulement (Conseil national de sécurité, 1962). Des personnes qui se trouvent dans des réservoirs de produits humides en train de se vider par gravité dans des séchoirs à grains à lots automatiques peuvent facilement être englouties en cours de rechargement du séchoir avec du grain humide. Certains ouvriers sont morts par suffocation à la suite d'une chute dans des espaces vides comme il s'en produit fréquemment, sous des formations de ponts de grains (fig. 15). Ils ont été engloutis sous des masses de grains moisis qui se sont effondrées sur eux; d'autres ont respiré des gaz toxiques produits par des grains avariés (University of Kentucky, 1984). Des cas de suffocation provenant d'une défaillance du diaphragme peuvent également se produire sous l'action des vapeurs de soudure à l'intérieur des silos en réparation (Broadhurst, 1985).

On peut éviter les cas de suffocation en observant les mesures suivantes :

- Installer des échelles à l'intérieur des silos.
- Prévoir des harnais et des cordes de sécurité.
- Prévoir de longues tiges et des râteaux pour briser les croûtes de grains.
- Acheter un système de respiration autonome.
- Apprendre comment débrancher le système électrique d'un silo.
- Établir un plan d'action pour se porter au secours des ouvriers en difficulté dans un silo.
- Ne jamais entrer dans un silo hermétiquement fermé sans y faire entrer d'abord un jet d'air frais.
- Ne jamais marcher dans des grains de lin ou de millet.
- Ne jamais entrer dans un silo contenant du grain avarié sans porter un appareil de respiration autonome.
- Ne jamais entrer dans un silo sans fermer le courant électrique des systèmes du silo.
- Briser les croûtes et les ponts au moyen d'une barre ou d'un râteau sans pénétrer dans le silo.
- Briser les croûtes et les ponts en utilisant un appareil à air comprimé (fig. 12) sans pénétrer dans le silo.

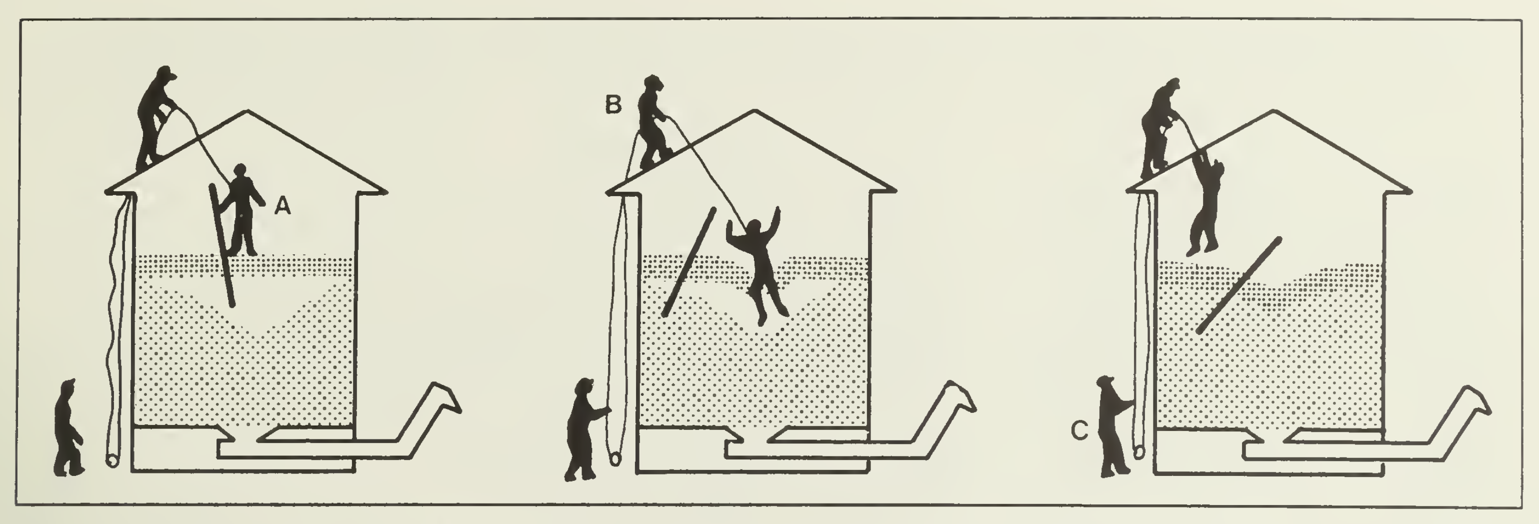


Figure 16 Enquête menée par trois personnes (dans un souci de sécurité) sur une cellule douteuse : *A*, la personne qui se trouve à l'intérieur est reliée à l'extérieur de la cellule; *B*, la personne qui se trouve sur le toit transmet les instructions et aide à soulever; *C*, la personne qui se trouve en bas aide à tirer ou va chercher du secours (d'après University of Kentucky, 1984).

- Ne jamais entrer dans un silo sans être attaché par un harnais ou une corde de sécurité. De plus, il faut être ancré à une deuxième personne. Une troisième personne doit être prête à intervenir ou à demander du secours (fig. 16).
- Se rapprocher ***immédiatement*** de la paroi si le grain commence à s'écouler.
- Fermer les panneaux des trous d'homme situés au sommet des silos vides.
- Utiliser les sellettes avec prudence, en ne travaillant qu'au-dessus des adhérences (fig. 12).

Voici un exemple qui illustre bien la difficulté de retirer du grain des personnes qui y sont emprisonnées. Dans l'Ouest canadien, un sauveteur avait découpé un trou de 30 cm sur le côté d'un silo contenant des céréales échauffées qui devaient être déchargées au moyen de l'auget. Peu après un travailleur inexpérimenté fut porté disparu. On le trouva enfoui jusqu'aux épaules dans le grain du silo. L'auget a été immédiatement arrêté et cinq hommes munis de pelles essayèrent, sans succès, d'extraire l'homme en difficulté. En dernier recours, il fallut attacher une corde autour de la taille de l'homme et la fixer solidement au toit. L'auget a été alors remis en marche de façon à abaisser le niveau du grain, et finalement l'ouvrier a été retiré sain et sauf (E. Dorge, communication personnelle, 1986).

Gas toxiques

L'exposition aux gaz toxiques, qui se forment en cours d'entreposage des produits ou des sous-produits agricoles, a entraîné de nombreux cas de décès parmi les familles des fermiers et leurs employés au cours des dernières années. Le dioxyde d'azote (NO_2), le monoxyde de carbone (CO), et le dioxyde de carbone (CO_2) sont des gaz qui se dégagent le plus souvent en cours de manutention des produits entreposés tandis que le sulfure d'hydrogène (H_2S), l'ammoniac (NH_3) et le CO_2 se produisent en cours d'entreposage des purins (tableau 10) (Agriculture Canada, 1979). On trouve également du méthane (CH_4), extrêmement inflammable (Broadhurst, 1985). Quant au cyanure d'hydrogène (HCN), qui se produit en cours d'entreposage des graines de lin moisies, il est absorbé directement par la peau et peut entraîner la mort (Western Producer, 1977).

Le dioxyde d'azote, qui est produit dans certaines conditions par des matières vertes comme du maïs haché ensilé, est extrêmement toxique; à forte concentration, il a une coloration caractéristique, rougeâtre ou jaune, qui apparaît quelquefois à la surface des produits. À faible concentration, il est incolore et inodore, mais tout aussi mortel. Le dioxyde d'azote peut se développer au cours des 6 premières heures qui suivent la mise en place des matières dans le silo, tandis que la période la plus dangereuse s'étend entre 12 et 60 heures après le remplissage. Normalement, le gaz prend de 3 à 6 semaines pour se dissiper, mais sans ventilation, il peut rester sur place indéfiniment (Jonas, 1979). Lorsqu'il est inhalé, il entre en réaction avec l'eau qui se trouve dans l'appareil respiratoire pour produire des acides qui brûlent la bouche, le nez, la gorge et les poumons. Les premiers symptômes sont souvent une sensation de brûlure et la toux. L'inhalation de NO_2 peut provoquer la maladie des remplisseurs de silo ou la pneumonie au dioxyde d'azote (Grayson, 1957).

Le monoxyde de carbone est presque aussi toxique que le NO_2, car il est incolore, donc visuellement indétectable, et il se produit en cours d'ensilage ainsi qu'au cours de la combustion incomplète des matières pendant les incendies. Il a également été détecté dans du lin de catégorie échantillon et dans des graines de soja en cours d'échauffement (Ramstad et Geddes, 1942). L'exemple suivant illustre la façon dont le CO peut provoquer un danger immédiat en cours d'opération de lutte contre le feu (Reanney, 1969). Un pompier qui combattait un incendie dans la cale

Tableau 10 Gas toxiques rencontrés dans des installations d'entreposage (Agriculture Canada, 1979)

Gaz toxique	Formule chimique	Densité	Toxicité	Inflammabilité (% par vol. dans l'air)	Description	Sources
Dioxyde d'azote (gas de silo)	NO_2	1,58 (plus lourd que l'air)	5 ppm (extrêmement toxique)	–	Rougeâtre a certaines concentrations, odeur d'eau de javel	Sous-produits des premiers stades de la fermentation des fourrages en silo.
Monoxyde carbone	CO	0,96	50 ppm	12–74 % (très inflammable)	Incolore, inodore	Sous-produits de la combustion incomplète des matières carbonnées; se développe dans les matières en cours d'échauffement et dans les feux.
Dioxyde de carbone	CO_2	1,53 (plus lourd que l'air)	5 000 ppm	–	Incolore, inodore	Produit de la respiration; se développe dans les silos de grains et de nourriture du bétail, les silos à limitation d'oxygène et dans les systèmes contenant du purin.
Sulfure d'hydrogène	H_2S	1,19	10 ppm	4–50 %	Odeur suffocante, inodore	Se forme dans les systèmes contenant du purin, se produit en cours de digestion anaérobie sans surveillance des substances organiques.
Ammoniac	NH_3	0,60	25 ppm	10–30 %	Odeur suffocante, incolore	Sous-produit de la putréfication se formant dans le purin.

d'un navire s'était rendu dans une cale adjacente vide pour examiner les cloisons. Parce que cette cale vide ne présentait absolument aucune trace de fumée ni de chaleur, il avait omis de porter un appareil respiratoire. En la traversant, le pompier s'est senti soudainement mal. Heureusement on se porta rapidement à son secours. La cause de cet accident a été attribuée à une poche de CO provenant d'une fuite à travers des fentes dans la cloison de la cage voisine où se trouvait le feu. En raison du danger que présentent le CO et les autres gaz, il est donc indispensable de porter un appareil respiratoire lorsqu'on se rend dans des espaces clos proches d'un incendie.

Le dioxyde de carbone (CO_2) est incolore, relativement moins toxique que le NO_2 et le CO à faible concentration, mais à des concentrations élevées, il peut être mortel. Il est souvent produit par la respiration des grains, les moisissures et les insectes dans les grains et les aliments pour le bétail, dans les silos à limitation d'oxygène et en cours d'ensilage de matières vertes.

On peut éviter les empoisonnements par gaz toxiques au moyen des précautions suivantes :

- Surveiller les niveaux de NO_2, CO_2 et de CO dans les silos au moyen d'un système de tubes en plastique, de seringues hypodermiques et de tubes de Dräger (fig. 9) (Wilkins, 1985*a*).

- Se rappeler qu'il ne faut jamais entrer dans des silos à limitation d'oxygène, dans des réservoirs à grains et à aliments pour le bétail contenant du grain avarié, sans porter un appareil respiratoire autonome, un harnais relié à une corde et sans l'assistance de deux personnes entraînées.

- Rappeler aux membres de sa famille ainsi qu'aux travailleurs de la ferme les dangers du NO_2 dans les silos, qui se présentent chaque année à la moisson.

- Rappeler que le NO_2 est plus lourd que l'air et qu'une porte ouverte à proximité de la surface du produit ensilé risque de permettre au gaz de descendre le long de la glissière dans la chambre inférieure. Du bétail a trouvé la mort lorsqu'une porte reliant le silo à l'étable resta ouverte un certain temps. Dans un autre cas, des hommes qui montaient le long de l'échelle de la glissière ouvrirent une porte au-dessus de leur tête; ils ont succombé sous l'action du gaz qui s'était écoulé en descendant le long de la glissière. Par conséquent, il faut toujours fermer la porte qui relie l'étable à la pièce qui contient le fourrage, et toujours ouvrir les portes et fenêtres de cette dernière pièce de façon à laisser l'air frais pénétrer dans la glissière (Jonas, 1979).

- Toujours ventiler avec soin, avant d'y entrer, les silos contenant des fourrages récemment moissonnés.

- Au moyen d'un ventilateur, chasser les gaz toxiques que l'air des silos peut contenir.

Voici un autre exemple qui illustre bien les dangers que présentent les gaz toxiques dans les fermes (Jonas, 1979).

Dans une ferme de l'Ontario, un jeune homme de 17 ans était entré dans un silo vertical de 12 m sur 3,6 m dans lequel quatre chargements de maïs haché qui contenaient de fortes quantités de nitrate avaient été placés 6 heures auparavant. Après moins de 5 minutes alors qu'il était en train d'aplanir le maïs dans le silo, il se sentit étourdi. Il sortit du silo et commença à se sentir faible et à avoir la nausée. Puis il se mit à délirer, à vomir et à se plaindre de suffocation. Bien qu'il n'ait ni vu ni senti le gaz toxique, son sang contenait un niveau de dioxyde d'azote presque mortel. Un an encore après l'accident, il souffrait des effets secondaires de cette intoxication : il se sentait vite fatigué et, durant les journées humides, il ressentait des brûlures aux poumons, au nez et à la gorge; son odorat commença à revenir, mais le sens du goût lui manquait toujours. Il devait prendre soin d'éviter les endroits poussiéreux car son nez avait perdu les poils qui permettent de retenir des particules nuisibles. Il s'étouffait encore fréquemment en s'alimentant. Les radiographies montraient que ses poumons étaient aussi encrassés que ceux d'un homme qui aurait fumé pendant 90 ans. On considéra qu'en raison de sa jeunesse, les dommages s'atténueraient probablement avec le temps.

Fumigants

Au Canada, on utilise des phosphures d'hydrogène (phosphine), produits à partir de phosphure d'aluminium et de magnésium, pour lutter contre les infestations des produits entreposés par les insectes. Dans les cales vides des navires et dans les moulins, on utilise le bromure de méthyle. Généralement, ce sont des professionnels qui effectuent les fumigations. Les responsables d'élévateurs, le personnel qui s'occupe des wagons, des usines ou des navires doivent être au courant des effets toxiques et du comportement des produits utilisés en fumigation sur leurs lieux de travail (par exemple, leur réaction avec l'eau et leur pénétration dans les espaces adjacents). Ils doivent connaître aussi les mesures de secourisme à appliquer en situation d'urgence. Des empoisonnements se sont produits dans des élévateurs à grains lorsque des travailleurs sont entrés dans des fosses ou des silos ayant subi une fumigation 1 à 2 semaines auparavant ou sur des navires où ces produits s'étaient écoulés d'un chargement traité dans les compartiments des passagers. Davis et Barrett (1986) ont donné un résumé du déroulement d'un programme de fumigation à bord d'un navire en transit aux États-Unis ainsi que des mesures de sécurité : normalement, on aère les cales qui ont subi une fumigation au port de débarquement en ouvrant tous les panneaux d'écoutille. Toutes les 30 minutes, on vérifie à un mètre les concentrations de gaz de fumigation au-dessus de la surface du grain, jusqu'à ce qu'elles soient égales ou inférieures à 0,3 ppm. À ce moment, le grain peut être déchargé sans danger, soit par aspiration, soit au moyen d'une benne.

Les empoisonnements par gaz de fumigation peuvent être évités en prenant les mesures suivantes :

- Se rappeler que les gaz et les vapeurs de la fumigation peuvent se répandre jusqu'aux habitations voisines.

- Pratiquer des fumigations au cours d'une journée sans vent.

- Placer des panneaux d'avertissement bien en vue sur les installations ou les stocks traités par fumigation.

- Ne jamais travailler seul.

- Pour ouvrir les écoutilles, les portes et les fenêtres après une fumigation, porter de préférence un appareil respiratoire autonome.

- Changer la cartouche des masques à gaz à chaque utilisation.

- Surveiller les niveaux de phosphine et de bromure de méthyle au moyen d'un tube de Dräger ou autre dispositif.

- Éviter d'utiliser de l'eau sur des matières ayant subi une fumigation à la phosphine, sinon des quantités supplémentaires de phosphine peuvent être produites.

Dans Bond (1984), on trouvera une description détaillée de la lutte contre les insectes par la fumigation, ainsi que des mesures de sécurité recommandées.

Feux et explosions

Les feux et explosions peuvent être dangereux pour le personnel des installations qui se trouve sur place, mais aussi, par une modification de l'environnement, pour les pompiers et les sauveteurs. Afin de limiter les risques, ils doivent être au courant du genre de denrées en question, afin de choisir les moyens appropriés pour éteindre le feu (mousse, eau, sable, CO_2) ainsi que les appareils respiratoires convenables. Ils doivent également demander s'il y a des bouteilles de gaz, des produits chimiques ou autres substances dangereuses. De même les opérateurs chargés de la récupération doivent être avertis qu'il y a peut-être des bouteilles de gaz qui sont encore dans les ruines. On doit les mettre en garde contre l'affaiblissement des structures, par exemple les murs qui risquent, si on les frappe, de libérer des volumes importants de matières brûlantes.

On sait que les feux et les explosions se produisent fréquemment dans les silos verticaux contenant de l'herbe ou du foin ensilé (Koegel et Bruhn, 1971). Les pompiers qui luttent contre de tels incendies doivent être conscients du risque d'explosion. Campbell (1973) décrit la suite d'événements qui ont conduit à l'explosion d'un silo partiellement rempli, du modèle qui se décharge par le bas, et contenant du foin ensilé, brûlant sans flamme : ce type de feu qui couve en profondeur produit un mélange de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone inflammable. Comme à l'habitude, les pompiers se dirigèrent vers le sommet du silo à une hauteur de 18 m au-dessus du niveau du sol; ils ouvrirent le panneau et dirigèrent un jet d'eau et de mousse dans le foin incandescent, introduisant ainsi une certaine quantité d'air dans le silo. Les éléments nécessaires à une explosion étaient donc tous réunis : un gaz inflammable et de l'oxygène dans un réservoir fermé. Une étincelle jaillissant probablement d'une braise incandescente déclencha l'explosion (Campbell, 1973). ***Aujourd'hui, les directives de lutte contre l'incendie sont beaucoup plus sûres (voir la section sur les silos verticaux).*** Dans Campbell (1973) et Singley (1968), on trouvera la description des explosions qui se produisent dans des silos contenant du fourrage. Boumans (1985) décrit les effets des explosions de poussière dans les silos contenant des grains et des produits des grains ainsi que les méthodes qui permettent de prévenir et de se protéger des explosions. Aldis et Lai (1979) ont passé en revue les publications qui traitent de l'ingénierie relative aux explosions de poussières de grain. Pour les méthodes d'enquête sur les incendies et les explosions, se reporter au chapitre 8.

Enfin, le Conseil national de sécurité (1962) donne un excellent résumé des mesures de sécurité à employer lorsqu'on a à travailler dans des silos de grains et d'aliments pour bétail dans divers types de réservoirs, des wagons citernes de produits alimentaires et des réservoirs qui servent à entreposer des liquides.

Chapitre 8 Méthodes d'enquête

Le but de ce chapitre est de fournir des directives utiles aux personnes qui font une enquête sur les causes de problèmes de détérioration qui entraînent la maladie ou la mort d'animaux ainsi que sur les problèmes d'échauffement qui peuvent provoquer des incendies ou des explosions. Pour mener des enquêtes sur ces deux types de problèmes, il faut avoir recours à une méthode systématique et rigoureuse pour tirer le meilleur parti possible des renseignements obtenus. Il est de la plus grande importance de rassembler ces renseignements ainsi que tous les documents à l'appui, pour le cas où des poursuites judiciaires seraient entreprises par la suite (voir chapitre 9).

Pour un excellent compte rendu du type de dommages causés aux denrées en cours d'entreposage, d'arrimage et de transport, nous conseillons au lecteur de se reporter à Knight (1985).

DÉTÉRIORATIONS ET/OU MALADIES ANIMALES

Pour étudier des détériorations de contexte inconnu, voici les étapes qu'il faut suivre (résumé : tableau 11).

Rassemblement des renseignements

Se rendre rapidement sur les lieux et interroger les personnes-clés, comme les témoins oculaires. Prendre des photographies des installations et des animaux malades ou morts.

Étendue des détériorations

Déterminer la source des matières détériorées ou susceptibles de transmettre des maladies : si elles ont été produites, entreposées et données en nourriture sur place ou si elles ont été manufacturées à l'extérieur de l'installation avant d'y être portées pour être entreposées et données en nourriture (granulés à l'usage du bétail). Déterminer si les matières

Tableau 11 Mesures conseillées pour enquêter sur les problèmes de la détérioration et sur les problèmes de maladies animales en cours d'entreposage de denrées agricoles

1)	Rassemblement des informations	- Se rendre sur place aussitôt que possible. - Interroger les personnes-clés. - Prendre des photographies des installations et des animaux malades.
2)	Étendue des détériorations	- Déterminer si la source des matières endommagées ou associée à la maladie est à rechercher sur place ou à l'extérieur. - Déterminer si les matières détériorées constituent une partie ou la totalité de la ou des cellules sur place. - Si elles ne constituent qu'une partie, déterminer l'emplacement des matières endommagées à l'intérieur des cellules. - Prélever des échantillons des matières endommagées et intactes, les identifier et les photographier.
3)	Causes des détériorations	- Si la détérioration s'est produite dans la partie supérieure de la cellule, vérifier les points suivants : panneaux d'ouverture mal ajustés, boulons manquants, eau dans l'élévateur à godet, migration d'humidité, problèmes d'aération, non-utilisation d'un disperseur. - Si la détérioration s'est produite dans la partie inférieure, rechercher les points suivants : fuite entre les parois de la cellule et le sol de béton, portes mal ajustées. Vérifier également les points morts au-dessus du plancher d'aération. - En cas de détérioration générale, probabilité de teneur en eau des produits trop élevée pour une bonne conservation.
4)	Maladies animales	- Éliminer les infections comme cause de la maladie. - Changer de nourriture. - Enquêter sur les origines du troupeau ou de l'espèce.

(suite)

Tableau 11 Mesures conseillées pour enquêter sur les problèmes de la détérioration et sur les problèmes de maladies animales en cours d'entreposage de denrées agricoles (*fin*)

4)	Maladies animales (suite)	- Enquêter sur l'origine de l'alimentation (nouvelle expédition). - Enquêter sur les origines des fournitures (nouveaux fournisseurs). - Prendre contact avec le vétérinaire, vérifier les résultats d'autopsie. - Rechercher les sources des matières moisies. - Prendre des échantillons des matières endommagées et intactes, identifier et photographier.
5)	Analyse des échantillons	- Rechercher les élévations de teneur en eau et de teneur en acides gras libres. - Rechercher une diminution de la germination des grains. - Rechercher la présence d'odeurs déplaisantes ou de moisi. - Rechercher les moisissures d'avant et d'après récolte. - Rechercher les mycotoxines. - Vérifier la composition et les doses de nourriture.
6)	Lutte et prévention	- Détérioration : retirer et rejeter les matières atteintes, sécher le reste et réensiler, fermer hermétiquement les cellules, aérer. - Maladies animales : changer de nourriture, changer de fournisseur, passer des commandes à court terme.
7)	Résumé	- Les détériorations sont souvent provoquées par un entreposage inapproprié. - Des maladies animales peuvent être causées par la présence de mycotoxines dans l'alimentation, par des erreurs commises dans la formulation ainsi que par d'autres agents et facteurs. Consulter un vétérinaire qui connaît les types de maladies envisagées comme cause probable chez les animaux en question.

endommagées ou suspectes formaient une partie ou la totalité du contenu d'une ou plusieurs cellules de l'installation. Si les dommages étaient limités à une seule cellule, les matières touchées se trouvaient-elles dans la partie supérieure ou la partie inférieure de la cellule? dans des poches? à proximité de la partie centrale supérieure? près des portes? près du plancher d'aération? sous les goulottes? à la surface ou près des parois? ou adhérentes à ces dernières? Prendre de bons échantillons des matières atteintes et non atteintes pour mieux les comparer. Il faut se servir d'un échantillonneur à godet à plusieurs chambres ou d'une sonde en profondeur pour silo. Il faut ensuite mettre les échantillons dans des sacs de plastique à double paroi, les sceller et les placer dans un conteneur réfrigéré pour les transporter au laboratoire. On doit identifier les échantillons en utilisant les étiquettes qui se trouvent dans les sacs. Prendre des photographies des matières atteintes et des matières intactes.

Causes des détériorations

Si les matières endommagées se trouvaient dans la *partie supérieure* de la cellule, il est probable que cette détérioration ait été provoquée par un apport d'humidité qui a pénétré dans la région atteinte et s'y est logée. La pluie ou la neige a pu entrer par des panneaux ouverts ou mal fermés ou par des joints mal scellés entre les tôles ou encore par des trous de boulons. Parmi les autres possibilités, il faut penser à des entrées d'eau s'écoulant des godets de l'élévateur, des goulottes à grains, au déplacement de l'humidité dans les cellules non aérées, au développement d'un front d'humidité dans les cellules aérées, causé par l'emploi de ventilateurs de taille inappropriée ou à l'arrêt de l'aération, ou encore à une trop grande quantité de graines de mauvaises herbes, ou à l'accumulation de particules fines sous les goulottes, du fait qu'on n'a pas utilisé de disperseur, ou qu'on l'a utilisé de façon inappropriée. Si les matières endommagées se trouvent dans la *partie inférieure* de la cellule, il est possible que l'apport de l'humidité se soit produit par une fuite entre le plancher de béton et la paroi de la cellule ou par une porte mal fermée. On peut encore trouver des matières fortement humides, au printemps, dans les points morts situés près des parois, au-dessus des planchers d'aération partiellement perforés. Si les détériorations notées dans la cellule ne sont pas limitées à un seul endroit, il est possible qu'une partie ou que la totalité des grains aient été entreposées à une température trop élevée ou avec une teneur en eau excessive, impropre à une bonne conservation.

Tableau 12 Mesures conseillées pour enquêter sur les problèmes d'échauffement, de feux et d'explosions dans des denrées entreposées

1)	Rassemblement des informations	- Se rendre sur place aussitôt que possible. - Interroger les personnes-clés ainsi que les témoins oculaires sur l'origine du problème. - Chercher dans les journaux locaux comptes rendus et photos. - Prendre des photos.
2)	Étendue des détériorations	- Déterminer la nature et le volume des denrées en question. - Déterminer les dommages causés aux installations et aux stocks. - Vérifier l'âge et le mode de construction des installations. - Vérifier l'état des structures des installations. - Vérifier les dangers possibles d'incendie. - Vérifier quelles sont les mesures contre l'incendie ou autres qui ont été utilisées.
3*a*)	Causes de l'échauffement	- Entreposage de matières à forte teneur en eau - Méthode d'entreposage inappropriée ou inadéquate : nettoyage, aération, retournement, surveillance, désinsectisation - Pénétration de l'humidité par des fuites, par les élévateurs et les godets - Humidimètre défectueux, mal étalonné - Proximité de tuyauterie de vapeur ou autre source de chaleur - Mauvaise utilisation de produits de fumigation
3*b*)	Causes de l'incendie ou de l'explosion	- Incendie criminel - Soudure - Mécanique - Électrique - Foudre - Électricité statique - Mauvaise utilisation des produits de fumigation - Auto-inflammation, présence de blocs de matières brûlantes à l'intérieur des stocks, dans les wagons ou dans les navires - Explosion, utilisation d'eau ou de mousse pour éteindre le feu dans le silo

(suite)

Tableau 12 Mesures conseillées pour enquêter sur les problèmes d'échauffement, de feux et d'explosions dans des denrées entreposées (*fin*)

4) Examen des installations	- Se procurer un plan des installations indiquant l'emplacement et le contenu de chaque cellule d'entreposage. - Examiner la structure et le contenu à la recherche des causes figurant à la section 3*b*. - Déterminer l'emplacement de la première source de chaleur, de son chemin jusqu'au feu et à l'explosion. - Rechercher des contenants abandonnés de produits de fumigation. - Prélever les échantillons de matières atteintes et intactes, les étiqueter, les placer dans des sacs spéciaux et les photographier.
5) Examen des échantillons	- Distinguer entre les matières détériorées, brûlées en entreposage et incendiées. - Les mettre en rapport avec l'emplacement des détériorations, de l'échauffement, du feu ou de l'explosion. - Examiner les blocs de matières agglomérées noires et faire le rapport avec l'auto-inflammation ou le feu survenu ultérieurement.
6) Résumé	- Les problèmes d'échauffement ont les plus grandes chances d'être causés par l'activité biologique et chimique. - Les incendies et explosions ont peu de chances d'être provoqués par l'auto-inflammation. Par conséquent, envisager en premier lieu les autres causes, comme l'incendie criminel en premier lieu. - L'auto-inflammation peut se produire lorsque les matières échauffées sont aérées ou exposées à l'air. - Les explosions peuvent se produire lorsqu'on transporte les matières brûlantes agglomérées dans une installation après les avoir sorties d'un wagon, d'une péniche ou d'un camion.

Maladies des animaux

En cas de maladie des animaux, changez leur alimentation courante et donnez-leur de la nourriture fraîche pour dissiper les symptômes, ce qui permettra, selon les cas, de retenir ou d'éliminer la première source comme cause de la maladie. On doit donc envisager les mesures suivantes : vérifier les antécédents de l'espèce ou du troupeau ainsi que son taux normal de morbidité; examiner les circonstances qui ont accompagné l'alimentation actuelle, c'est-à-dire déterminer si les symptômes de maladie doivent être associés à une livraison antérieure ou à une nouvelle livraison; se renseigner sur le fournisseur, savoir s'il est digne de confiance ou si d'autres clients ont eu des problèmes avec lui; analyser la maladie et les symptômes possibles de stress avec le vétérinaire; si possible, assister à l'autopsie et prendre des photographies; rechercher les possibilités de pollution de la nourriture : des écoulements d'eau ou de pluie dans les mangeoires, des blocs de matières durcies dans la nourriture ou l'utilisation de grains moisis qui peut être associée aux toxines; prélever des échantillons des matières atteintes et des matières intactes (comme témoin), identifier ces échantillons et les photographier.

Analyse des échantillons

Examiner tous les échantillons suspects, ainsi que les échantillons témoins, à la recherche d'une augmentation des niveaux de teneur en eau, des baisses de niveau de germination des grains, des hausses de niveau d'acide gras, de la présence d'odeurs déplaisantes ou de moisi ainsi que de la présence de certaines espèces de moisissures avant ou après récolte. Dans les cas de maladies animales, analyser les échantillons à la recherche des aflatoxines, de l'ochratoxine A, de la stérigmatocystine, de la citrinine, de la patuline, de l'acide pénicillique, des trichothécènes, de la zéaralénone et autres mycotoxines, suivant les moisissures qui se développent avant ou après récolte et selon les symptômes que présentent les animaux malades. Faire une analyse des ingrédients, des aliments manufacturés, afin de vérifier si certains éléments de leur composition n'ont pas été intégrés à dose double ou même triple.

Avis sur les moyens de lutte et de prévention

Une fois déterminée la cause de la détérioration, il faut prendre les mesures nécessaires pour maîtriser la situation et éviter qu'elle ne se reproduise. On doit retirer et rejeter les matières endommagées, rincer ou pulvériser les parois avec une solution de Chlorox® (deux parties de Chlorox® pour huit parties d'eau) pour éliminer les moisissures

d'entreposage (Charles, 1985); si nécessaire, sécher les matières intactes et les remettre en silo. À titre préventif, fermer hermétiquement les cellules et installer les dispositifs appropriés d'aération et de surveillance.

Dans les cas de maladies animales, changer de nourriture ou de fournisseur et ne commander que les quantités nécessaires pour une consommation à court terme.

Résumé

Au cours de l'enquête, ne pas oublier que les détériorations sont le plus souvent provoquées par l'entreposage des matières dans de mauvaises conditions : par exemple, la teneur en eau et la température étant trop élevées au départ, les matières auraient dû être séchées ou aérées; ou bien les matières avaient été mal aérées ou traitées de façon impropre avec de l'acide propionique pendant la période d'entreposage ou encore, la teneur en eau avait augmenté à certains endroits du silo en cours d'entreposage, soit à cause d'un déplacement d'humidité, soit à cause de fuite dans le toit et dans les parois. Les symptômes de maladies des animaux peuvent être causés par des mycotoxines ou des erreurs de dosage dans les ingrédients des aliments, ainsi qu'avec de nombreux autres agents ou facteurs. L'aide d'un vétérinaire expérimenté, bien au fait de ces types de maladies particulières aux animaux est essentielle pour déterminer la cause exacte de la maladie.

ÉCHAUFFEMENT, FEUX ET EXPLOSIONS

Les problèmes de ce genre peuvent être d'une importance relativement mineure, par exemple des poches de matières échauffées à l'intérieur d'un chargement, ou d'une importance majeure comme un incendie ou une explosion entraînant la destruction d'installations d'entreposage et des dommages aux denrées entreposées. Les étapes à suivre pour enquêter sur les problèmes d'échauffement, d'incendie ou d'explosion sont décrites au tableau 12. Elles peuvent servir de liste de contrôle des points essentiels à passer en revue dans la plupart des cas. Cependant, en raison de la nature complexe et du caractère particulier des problèmes, cette liste ne convient pas à toutes les éventualités.

Les principales étapes à suivre lorsqu'on enquête sur un échauffement, un incendie ou une explosion, comme décrites au tableau 12, sont les suivantes :

Rassemblement des renseignements

Se rendre rapidement sur les lieux pour interroger le personnel de service ou non, les évaluateurs des assurances, les pompiers, les policiers, les journalistes et les témoins oculaires au sujet de la source de l'échauffement, du feu ou de l'explosion. Enfin, prendre des photographies et des échantillons avant qu'on ne déplace trop de choses sur les lieux mêmes du sinistre.

Étendue du problème

Déterminer la nature, le type et le volume de la ou des denrées en question; l'étendue des dommages causés aux installations et aux stocks; l'état des structures des installations et les risques de danger; enfin, les méthodes de lutte employées contre l'incendie.

Causes de l'échauffement

Examiner les documents relatifs à la température, la teneur en eau et l'état des produits, afin de déterminer s'il existe des poches de matières à forte teneur en eau qui pourraient devenir une source d'échauffement des denrées. L'examen de ces documents et les entretiens avec le personnel permettent d'évaluer la fréquence et le degré de qualité des opérations de nettoyage, d'aération, de retournement, de surveillance et de lutte contre les insectes pratiquées dans l'installation. Voici les causes possibles de problèmes d'échauffement que l'on doit vérifier : l'entrée inapparente de pluie ou de neige, par des fuites ou l'entrée d'eau provenant des élévateurs à godets, ou encore l'utilisation d'humidimètre défectueux ou mal étalonné, la proximité de tuyauterie de vapeur, de chambres de machines, d'ampoules électriques allumées ou enfin l'utilisation inappropriée de produits de fumigation.

Causes de feux ou d'explosions

Les feux peuvent être provoqués volontairement pour de nombreuses raisons, comme l'appât du gain, ou dans le but de cacher un autre crime, par désir de détruire ou de protester, dans le but de devenir un héros ou une héroïne ou encore pour satisfaire un besoin (trouble mental) ou par ennui (Dennett, 1980). Généralement, en raison de leurs agissements antérieurs, la présence et les activités des incendiaires volontaires dans une communauté sont déjà connus de la police. Des restes de chiffons graisseux, ainsi que d'autres traces matérielles, peuvent être retrouvés après un incendie, fournissant ainsi la preuve de leurs activités criminelles.

L'utilisation d'un équipement de soudure dans les installations ou dans leurs environs, peut provoquer des incendies, et plus particulièrement des explosions. Des étincelles peuvent se produire et fournir une première source d'inflammation entraînant, pour commencer, une explosion de poussière qui déloge des débris collés à des parties saillantes risquant ainsi d'alimenter par la suite un incendie d'importance majeure.

La surchauffe des roulements mécaniques et des moteurs électriques, ainsi que les défauts d'installation et de fils électriques constituent également des causes connues d'incendies (fig. 6). Comme la foudre peut mettre le feu aux structures, il est donc recommandé de vérifier si le paratonnerre est endommagé et s'il y a eu un orage au moment de l'incendie.

Parce que l'électricité statique peut provoquer des explosions dans des atmosphères poussiéreuses, on doit donc vérifier si des mesures ont été prises pour réduire le risque entraîné par les charges électrostatiques dans l'installation. Il n'est pas impossible également que des combinaisons

de travail en tissu synthétique ayant la faculté de retenir des charges électrostatiques aient joué un rôle important dans la cause de l'explosion.

Des produits fumigènes contenant des phosphures d'aluminium ou de magnésium sont utilisés sous forme de granulés ou de bandelettes pour détruire des insectes dans les minoteries ou autres zones d'entreposage en vrac. Lorsqu'elles sont exposées à l'humidité ou à la chaleur, ces substances produisent un gaz inflammable appelé phosphine. Pour cette raison, l'enquêteur doit vérifier auprès du personnel de l'installation si de telles fumigations ont été récemment pratiquées. Un incendie peut également être causé par l'addition accidentelle d'eau à des granulés ou par des bandes de substances fumigènes ou même par le contact de la pluie avec des emballages ayant contenu de tels produits et qui ont été jetés aux ordures. De fortes concentrations de ces granulés mal répartis à l'intérieur d'une masse de grains peuvent créer suffisamment de chaleur pour provoquer un incendie ou endommager les grains situés immédiatement au-dessus, entraînant ainsi un déclassement et une perte financière. Des ventilateurs placés sur des installations ayant reçu une fumigation de phosphine peuvent entraîner une inflammation causée par les variations de compression des gaz et par des étincelles provenant du ventilateur.

Des incendies et des explosions peuvent être causés par l'auto-inflammation de denrées fortement échauffées, se trouvant exposées à l'air ou à l'oxygène. Des matières agglomérées brûlantes à l'intérieur d'une masse entreposée froide indiquent un auto-échauffement ou une auto-inflammation sur place. Certains de ces blocs de matières peuvent avoir pris feu dès leur exposition à l'air et avoir fourni la source d'inflammation pour des explosions de poussière. Ces blocs de matières fondues peuvent provenir de l'intérieur d'un navire, d'une péniche, d'un wagon ou d'un silo. Ils ont pu être déplacés sur une certaine distance par les courroies de transporteur à l'intérieur d'une installation et parvenir ainsi au lieu du feu ou de l'explosion. Il peut y avoir un auto-échauffement si un liquide de couleur brune s'écoule des lignes de jonction des silos ou si des dépôts de suie se forment sous les planchers d'aération, à cause d'une mauvaise aération ou d'un fort échauffement des stocks. Souvent, des denrées en cours d'échauffement très avancé continuent de se consumer lentement pendant de longues périodes en ne s'enflammant que s'il leur est fourni un appoint d'air ou d'oxygène.

Les feux et les explosions peuvent être causés par des facteurs très complexes; voir un compte rendu très intéressant par Stanton (1987) sur le désastre du SS Green Hill Park.

Examen des installations

Se procurer un plan des installations indiquant l'emplacement et le contenu de chaque cellule d'entreposage, de chaque navire, de chaque péniche, de chaque camion ou wagon. Déterminer si au moment de l'incendie ou de l'explosion, il s'est produit un mouvement des stocks et, dans ce cas, le type de denrées et d'emplacement en question. Examiner l'installation et son contenu, à la recherche des traces de causes figurant au tableau 12, section 3*b*; si possible, inspecter les stocks de denrées en compagnie d'une personne expérimentée en récupération. Rechercher par exemple des chiffons trempés d'huile, signe d'un incendie criminel, et des contenants de produits fumigènes mis à l'écart, et qui pourraient constituer une cause d'incendie. Déterminer l'emplacement de la source initiale de chaleur et le cheminement probable du feu et de l'explosion, par un examen des lieux et des photographies. Se procurer des échantillons de matières intactes, de matières endommagées par le feu et par la chaleur, les étiqueter, les photographier et les placer dans des sacs.

Examen des échantillons

Dès réception au laboratoire, examiner les échantillons et les classer en catégories endommagées, brûlées en entreposage et brûlées au cours de l'incendie en établissant leur rapport avec les emplacements de détérioration, d'échauffement, de feux ou d'explosions dans l'installation. Des matières agglomérées par la chaleur peuvent indiquer la source d'un auto-échauffement ou correspondre à des dommages causés beaucoup plus tard, au moment où les matières entreposées étaient consumées par le feu.

Résumé

Les problèmes d'échauffement dans des denrées entreposées sont la plupart du temps causés par une activité biologique ou chimique. Les incendies et les explosions seront probablement causés par autre chose que l'auto-échauffement, c'est pourquoi il faut d'abord envisager d'autres causes, comme l'incendie criminel. Par contre, l'auto-inflammation a pu se produire si des matières agglomérées par la chaleur ont été exposées à l'air ou aérées. Et des incendies et des explosions peuvent se produire également lorsqu'on transporte des matières agglomérées par la chaleur dans une installation après avoir déchargé des silos, des wagons, des navires ou des camions.

Il n'est pas inconcevable qu'un jour notre lecteur aille en cour, soit à titre de demandeur, soit à titre de défendeur, ou comme témoin, ou encore à titre d'expert cité comme témoin dans un procès ayant trait à des denrées entreposées. Pour le profane, aller en cour peut être une expérience effrayante. L'objet de ce chapitre est de fournir quelques éléments d'information générale sur le sujet, en décrivant les procédures avant et pendant la comparution en cour. Ainsi que les types de cas qui peuvent se rencontrer dans le domaine des produits entreposés.

Le chapitre qui suit est tiré en grande partie de Sinkwich et Jamieson (1982), et dans une moindre mesure de Macdonald (1976) et se rapporte au Code civil canadien. Pour une description des procédures fédérales en usage aux États-Unis, on peut s'adresser à la Want Publishing Company (1984).

Les affaires sont identifiées par le nom du demandeur et celui du défendeur, la date et la publication judiciaire dans laquelle on peut les trouver. Ainsi la référence *Holian c. U.G.G.* (1980), 13 C.C.L.T. 269 Manitoba C.A., C.C.L.T. signifie Canadian Cases on the Law of Torts, 13 et 269 se rapportent au volume et à la page, et C.A. signifie Court of Appeal. D'autres abréviations que nous retrouverons dans ce chapitre sont les suivantes: A.C. (Appeal Cases), A.C.W.S. (All Canada Weekly Summaries), L.R. (Law Reports), H.L. (House of Lords), Q.B. (Queen's Bench) et So. 2d (Southern Reporter, 2nd series).

PROCÉDURES

De nombreux cas sont négociés et réglés hors cour par les avocats soit après une audience avant jugement, soit après une action *ad exhibendum* en présence d'un juge. Au cours de ces audiences, les avocats échangent des pièces et des examens des faits relatifs au cas. S'ils ne parviennent pas à un règlement, le cas est alors remis normalement à un tribunal civil.

Au cours du procès, le *demandeur* commence par présenter sa cause en citant ses témoins et en produisant ses preuves. Les *témoins* ne peuvent déposer que sur les faits réels dont ils ont été témoins. Les *experts cités comme témoins* sont des personnes qui possèdent la compétence requise ou les connaissances voulues dans le domaine d'une science ou d'une activité particulière et dont les qualifications doivent être reconnues par la cour. Une fois qualifiés, ils reçoivent la permission d'effectuer une ou plusieurs des démarches suivantes : en s'en tenant aux faits, exprimer une opinion professionnelle, tirer des conclusions, répondre aux questions hypothétiques ou expliquer des méthodes professionnelles au juge et au jury (Byrd et Stults, 1976). Au sujet du rôle et des droits des experts cités comme témoins, voir Cook (1964), et en ce qui concerne les directives à observer par les experts cités comme témoins en vue d'une déposition efficace, voir Brickey et Vazquez (1977). Le *défendeur* peut contre-interroger chacun des témoins du demandeur immédiatement après que le demandeur a achevé son interrogatoire direct. Lorsque le demandeur a présenté toutes ses dépositions, le défendeur présente sa défense de la même manière. Puis les deux partis présentent un résumé de leur cas, en commençant par le demandeur. C'est alors que prend place la discussion juridique, qui fait appel à des précédents valables et à une distinction entre les divers cas de la jurisprudence. Enfin, le juge prend une décision fondée sur la loi à appliquer et en fonction des faits tels qu'il les a reconnus.

Pour réussir, le demandeur doit fournir la preuve de sa propre version des faits en fonction du *rapport des probabilités* (c'est-à-dire en prouvant que sa version est la plus plausible). Une fois que le demandeur a présenté sa cause, le défendeur présente la sienne en produisant ses témoins et ses preuves qui peuvent faire l'objet d'un contre-interrogatoire par le demandeur. À la fin du procès, la cour, en tenant compte des probabilités attribuables à tous les témoignages reçus, décide si le demandeur s'est acquitté du fardeau de la preuve qui lui revenait et s'il a ainsi gagné sa cause.

Si le demandeur parvient à gagner sa cause, le jugement sera rendu en sa faveur et le juge décidera de la réparation appropriée, c'est-à-dire qu'il fixera l'étendue des dommages et des coûts. Les coûts de l'action judiciaire, y compris le temps passé en cour, sont également remis à la partie gagnante. On peut faire appel du jugement auprès de la *Cour d'Appel* et, dans certains cas, auprès de la *Cour suprême du Canada*. En appel, les arguments sont généralement fondés sur des points de procédure et non sur les faits.

DIVERSITÉ DES LITIGES

Un examen de la jurisprudence montre que les problèmes d'entreposage aboutissant à des litiges, en général, portent sur des détériorations, des échauffements, des infestations par les insectes, la santé des animaux, les feux et les explosions (tableau 13). Les affaires peuvent être complexes et entraîner plusieurs contre-procès. Par exemple, le propriétaire d'un silo peut poursuivre sa compagnie d'assurance qui, à son tour, peut contre-poursuivre la compagnie de construction d'élévateurs, les constructeurs d'équipements contre la poussière ou autres. Enfin, s'il y a mort d'homme, la famille éprouvée peut entamer d'autres poursuites judiciaires.

Les cas de détérioration, d'échauffement, d'infestation par les insectes, les problèmes de maladie des animaux, d'incendies et

Tableau 13 Types des problèmes d'entreposage pouvant entraîner des poursuites judiciaires

Type de problèmes	Emplacement	Cause probable
Détérioration et/ou échauffement	Silos	- perte de qualité causée par des fautes de gestion d'entreposage (mauvais magasinage) - livraison d'un produit de qualité médiocre destiné à l'entreposage - inefficacité de la limitation d'oxygène - mauvais fonctionnement de l'équipement : p. ex., ventilateur d'aération
	Navires	- manque de soins en cours de traversée - embarquement sur un navire de produits en mauvais état
Infestation par les insectes	Navires	- absence de désinfestation
Maladies animales et/ou mortalité	Étables	- nourriture défectueuse contenant des mycotoxines
Incendies	Silos	- livraison d'un produit de basse qualité - défaut de protection par N_2/CO_2
	Cellules	- aération d'un produit en cours d'échauffement
	Élévateurs	- réparations : soudure, frottemen
Explosion	Silos	- introduction de produits brûlants agglomérés, mettant la poussière en feu
Effondrement de structure	Silos	- écoulement du grain

d'explosions peuvent aboutir à un certain nombre de litiges de nature très différente, ainsi que le montre la liste suivante :

(a) *Poursuite pour rupture d'obligation légale* en vertu de la *Loi sur les grains du Canada* et des règles édictées par cette loi fédérale. On peut noter en particulier, l'art. 86, par. c : «L'exploitant autorisé d'un élévateur ne doit pas... sauf en vertu des règlements ou d'un arrêté de la Commission, recevoir dans l'élévateur ou en décharger du grain, des produits à base de grains ou des criblures qui son infestées ou souillées ou qui peuvent raisonnablement être considérées comme infestées ou souillées.» Toute personne ou corporation en infraction avec cet article est passible d'une amende ou d'un emprisonnement ou de l'une et l'autre peine, ainsi que le précise l'art. 89, par. 2 de la Loi. Il est à noter qu'il peut y avoir violation de la Loi et condamnation même s'il n'y a pas faute, blâme ou même négligence de la part de quelqu'un. Si du grain infesté est déchargé, l'entrepreneur qui le décharge est responsable. Cette conception plutôt sévère porte le nom de Responsabilité civile stricte, ou du fait des choses. Nous la rencontrerons à nouveau brièvement.

(b) *Dépôt*. Quand une personne entrepose du grain appartenant à une autre personne ou en prend possession aux fins de transport, on dit qu'il s'agit d'un *dépôt*. La personne qui prend possession des marchandises est appelée *dépositaire*; le consignateur ou propriétaire est appelé le *déposant*. Un dépositaire a une responsabilité de garde à l'égard du déposant, c'est-à-dire de prendre les soins requis pour la bonne garde des marchandises. Le dépositaire doit avoir la compétence nécessaire spécialement lorsque les denrées sont périssables, comme lorsqu'il s'agit de grains. Si l'engagement de responsabilité est rompu, le dépositaire (par exemple, l'exploitant de l'élévateur) peut être poursuivi en réparation pour rupture de contrat si l'entreposage était de nature contractuelle, ou en réparation de préjudices (responsabilité civile non contractuelle), par exemple pour détention illégale ou négligence, si le dépôt constituait une entreprise gratuite. Dans les deux cas, les poursuites pour rupture de l'engagement de soins de surveillance d'un dépositaire ont, en Angleterre et au Canada (mais pas aux États-Unis) une particularité importante de procédure. Une fois que le demandeur (déposant) a prouvé que le

dépôt a été effectué et que les marchandises ont été, à la longue, contaminées, endommagées, détruites ou simplement perdues, c'est au défendeur (dépositaire) de prouver qu'il n'est pas responsable du désastre. Sinon il sera tenu pour responsable.

Voici quelques exemples de cas de dépôt. Christensen et Kaufmann (1969) rapportent une affaire de ce genre qui s'est produite aux États-Unis : *entreposage sans soins suivant un dépôt contractuel.* Entre 1950 et 1960, à Cairo (Illinois), 6 600 t de blé d'hiver avaient été récoltées dans la région, transportées en camion et entreposées dans un silo de grande dimension. En cours de récolte, le temps avait été variable, avec des averses intermittentes. Selon le magasinier, la totalité du grain avait une teneur en eau moyenne et uniforme de 13,2 %. Cependant, certaines charges de camion avaient un taux de 14 % de teneur en eau. La plus grande partie du grain avait été entreposée entre 27 et 32 °C. En décembre, le grain avait commencé à s'échauffer et avait été transbordé afin de faire arrêter la détérioration et l'échauffement. Lorsqu'on le déchargea au début du printemps, 40 % du blé était endommagé jusqu'au germe. Il fut déclassé à la catégorie *Échantillon*, entraînant une perte de 242 000 $ U.S. On accusa le magasinier d'être responsable de cette perte.

Dans le procès qui s'ensuivit, le magasinier soutint qu'il avait fait preuve de soins et de précautions pendant l'entreposage des grains. Selon lui, leur mauvaise conservation avait été probablement causée par un gel survenu à la fin du printemps; les grains avaient donc été endommagés avant la moisson. Mais la suite du procès démontra que la détérioration et l'échauffement avaient été causées par la croissance de champignons d'entreposage sur les grains humides, c'est-à-dire les grains qui contenaient plus de 13,5 % d'eau à l'intérieur de la masse entreposée. À cause de sa gestion défectueuse, c'est le magasinier qui a été tenu responsable de la perte, car il n'avait pas vérifié les changements de teneur en eau ni s'il y avait des moisissures d'entreposage. De plus, il n'avait pas vérifié l'exactitude de son humidimètre.

Les mêmes auteurs nous donnent un autre exemple relatif à un dépôt aux fins de transport. En 1962, une cargaison d'environ 2 500 t de maïs blanc nº 2 en sac a été embarquée sur un navire à la Nouvelle-Orléans. Après une traversée de 18 jours à travers le golfe du Mexique, le canal de Panama et l'océan Pacifique, le navire est arrivé à El Salvador, sa destination. À l'arrivée, une grande partie du maïs était endommagé et le reste fut endommagé en cours d'entreposage par la suite, entraînant une perte totale de 200 000 $ U.S. Dans le procès qui s'ensuivit, la question à débattre a été de savoir si le maïs était en mauvais état et susceptible de se détériorer lorsqu'il avait été embarqué sur le navire ou si c'était un manque de soins en cours de traversée qui avait entraîné la perte.

Une enquête avait révélé que le maïs était en bon état au moment de l'expédition. L'expéditeur avait conservé un échantillon du maïs au moment du chargement, qui 2 ans après avait encore 80 % de pouvoir de germination, comportait moins de 2 % de grains endommagés, et était exempt de champignons de conservation visibles. Par contre, les échantillons de grains recueillis à partir des sacs déchargés à El Salvador avait 0 % de pouvoir de germination, de 20 à 40 % de grains endommagés et étaient gravement envahis par des champignons d'entreposage. De plus les espèces de champignons qui avaient envahi les grains de maïs stérilisés en surface indiquaient que ces grains avaient été exposés à une humidité relative de 85 à 90 %, et à une température modérément élevée pendant au moins 2 semaines. Dans le livre de bord, on avait indiqué que, pendant la traversée, l'humidité relative de l'air se situait entre 85 et 90 % tandis que la température variait la plupart du temps entre 27 et 29,5 °C. Le navire n'étant pas équipé de système de ventilation poussée, la ventilation s'effectuait par les manches à air qui restaient ouvertes sauf en période de pluie. Les sacs de maïs entreposés dans les cales étaient donc exposés à un courant continu d'air chaud et humide pendant la traversée. En exposant des échantillons de maïs de la même qualité que l'échantillon de chargement à une humidité relative située entre 85 et 90 % et à une température variant de 27 à 29,5 °C pendant 18 jours, il a été possible d'obtenir du grain dans le même état qu'à son arrivée à El Salvador. De plus, on y retrouvait les mêmes types de champignons d'entreposage. De telles preuves ont été considérées comme concluantes et la cause a été jugée en faveur de la compagnie céréalière qui avait fourni le maïs.

Un cas de présumée négligence de la part d'un dépositaire de grains est arrivé en Ontario. C'est celui de *Quintal et Lynch Ltd.* c. *Goderich Elevator Co.* (1923), 54 O.L.R. 200, réglé par un arrêt de la Cour d'appel de cette province. Un total de 2 100 t d'avoine fourragère nº 1 avait été confié à la compagnie défenderesse en vue de son entreposage. En raison d'un présumé manque de soins, l'avoine s'est échauffée et est devenue gourde. Après une étude approfondie du dossier, la Cour a conclu que l'échauffement et la détérioration s'étaient produits, selon toutes probabilités, à un moment où le défendeur n'était plus en possession de l'avoine, ce qui les exonérait de toute faute. Le dépositaire-défendeur a donc été déchargé du fardeau de la preuve qui lui revenait et reconnu non responsable.

(c) *Actions en responsabilité par négligence.* Dans une série de situations différentes, la responsabilité par négligence a été invoquée contre ceux qui i) entreposent du grain sans soins de telle sorte qu'il s'ensuit des dommages à d'autres personnes ou à la propriété d'autrui; ii) ceux qui ne portent pas attention à l'entreposage de grains de telle sorte que d'autres sont atteints accidentellement (par exemple par des feux, des explosions, par la propagation de contaminants ou de maladies, par l'exposition à des produits de fumigation; il faut alors

prendre des mesures de précaution coûteuses contre un de ces dangers); ou iii) contre ceux qui n'apportent aucuns soins à la construction des bâtiments, des structures ou des machines destinés à l'entreposage ou à la conservation des grains, entraînant ainsi une détérioration de ce grain.

Généralement, le plaignant, dans cette dernière situation, a un contrat signé avec le fournisseur ou le manufacturier coupable de négligence et il le poursuit pour rupture de contrat et non pour négligence; ces cas seront donc traités sous la section «Rupture de contrat».

Les deux premières situations (i) et (ii), cependant, correspondent à des cas typiques de négligence. Les cas rapportés sont rares, mais si quelqu'un entrepose mal du grain et que celui-ci se détériore, développe des toxines et, finalement fait mourir ou rend malade le bétail, cette personne sera responsable à l'égard du propriétaire du bétail; responsable par contrat (selon la Loi sur la vente des marchandises), si la personne lui a vendu de la nourriture contaminée directement (voir l'exemple cité par Schiefer et O'Ferrall, ci-dessous); responsable par négligence si la personne a vendu les aliments à un tiers qui l'a remis au consommateur final. La jurisprudence, dans ce contexte, est d'origine britannique : *Kendall* c. *Lillico* [1969] 2 A.C. 1 et *Ashington Piggeries* c. *Christopher Hill*, [1972] A.C. 441, qui font autorité auprès des cours canadiennes.

On peut imaginer des cas où du grain en état de surchauffe peut provoquer un incendie ou des cas où un entreposage inapproprié provoque une explosion occasionnant des destructions à la propriété d'un voisin; ou des cas où des produits chimiques servant pour la fumigation ont été utilisés ou stockés sans précautions (voir *Holian* c. *U.G.G.* (1980), 13 C.C.L.T. 269, Manitoba C.A. — le stockage défectueux de comprimés de phosphine avait donné lieu à une compensation de réparation de 90 000 $!) au point d'atteindre des personnes du voisinage; ou encore des cas où un manque de précautions face à une maladie ou à un contaminant biologique dans des installations avait provoqué des dommages catastrophiques chez des voisins (voir *Weller* c. *Foot & Mouth Diseases Research Inst.* (1969) 1 Q.B. 569).

Toutes ces situations peuvent entraîner une responsabilité civile par négligence et peut-être même, dans certains cas, une atteinte aux droits privés des voisins. Dans chaque cas, la question essentielle sera la suivante : le défendeur s'est-il comporté d'une façon raisonnable, soigneuse et expérimentée en ce qui regarde l'entreposage du grain et ses activités connexes. Si la réponse est non, le défendeur sera tenu responsable. Des experts peuvent être cités comme témoins au cours de ces procès afin d'exposer dans leur déposition ce que font normalement les personnes expérimentées dans ce domaine particulier d'activités. Il est très rare qu'une cour considère comme négligence ce qui constitue la pratique ordinaire et normale des personnes expérimentées dans un domaine donné. Le fait de se conformer à la pratique commune représente donc une excellente défense (mais pas invulnérable) contre une accusation de responsabilité par négligence.

(d) *Action en responsabilité stricte.* Au chapitre de la négligence, nous avons noté que la responsabilité par négligence peut être évoquée lorsque des incendies ou des explosions résultent d'un entreposage sans soins ou lorsque des ravageurs s'échappent de vos silos pour envahir ceux de vos voisins. Il est à noter que dans de tels cas vos voisins peuvent même ne pas avoir à prouver votre négligence ou toute autre faute de votre part car il s'agit d'un cas de «responsabilité stricte» en vertu du principe exposé dans l'affaire *Rylands* c. *Fletcher* (1868) L.R. 3 H.L. 330. Vous serez donc forcé de payer les dommages causés par cette infestation, même si vous n'encourez personnellement aucun blâme.

(e) *Obligation légale et responsabilité civile.* Les juristes ont toujours pensé que si quelqu'un rompt une obligation légale (par exemple l'art. 86 c) de la *Loi sur les grains du Canada*, citée précédemment), cette personne est automatiquement coupable non seulement d'un délit punissable, mais responsable du préjudice causé à toute personne dont les intérêts ont été ainsi lésés. Cette conception inquiétante a été récemment écartée par la Cour suprême du Canada dans l'affaire *The Queen* c. *Saskatchewan Wheat Pool* (1983), 23 C.C.L.T. 121.

La Commission canadienne du grain, agissant pour le compte de la Couronne, avait décidé qu'une cargaison de blé serait embarquée sur un navire appelé le «Frankcliffe Hall». Le blé avait été entreposé dans les élévateurs terminaux du défendeur, la Saskatchewan Wheat Pool, à Thunderbay, en Ontario. Une fois le grain embarqué et le navire en route, on découvrit qu'une partie du grain était infesté de larves de cucujides roux. La Commission dut alors décharger et pratiquer des fumigations dans les cales contaminées du navire; la facture s'est élevée à 98 261,55 $. La Commission a cherché à récupérer la somme, fondant son action sur la *Loi sur les grains du Canada*, art. 86*c*, qui interdit la livraison de grains infestés à partir d'un élévateur à grains. Un jugement rendu par la Cour fédérale décida que l'obligation légale à la charge des défendeurs était absolue et que sa rupture donnait lieu à une responsabilité civile de leur part, nonobstant l'absence de toute présomption ou de preuve évidente de négligence. Le défendeur a apporté des preuves comme de quoi il avait pris soin d'une façon raisonnable du grain mais elles ne furent pas retenues. Les défendeurs portèrent leur cause en Cour fédérale d'appel et obtinrent gain de cause, car il fut décidé que la *Loi sur les grains du Canada* avait pour objet la réglementation générale de l'industrie du grain et non de fournir matière civile à procès à une quelconque catégorie particulière

de personnes comme le demandeur. Le demandeur (la Commission) porta à son tour sa cause en Cour suprême du Canada, faisant valoir une fois de plus que la violation de la loi lui donnait un droit civil de poursuite. Par la suite, l'appel a été cassé et la Cour suprême a rejeté l'action du demandeur.

La Cour suprême arrêta que la violation d'une loi ne devait pas automatiquement être en elle-même regardée comme entraînant une responsabilité civile (c'est-à-dire une obligation de payer des dommages-intérêts, en compensation d'un préjudice ou d'une perte), si la loi se contente de prévoir une amende ou toute autre mesure punitive. Si la loi en elle-même prescrit une réparation civile pour rupture des obligations qu'elle a prévues, il ne reste qu'à s'y conformer. Mais, autrement, une infraction aux dispositions de la loi, un manquement aux règles de conduite qu'elle a fixées ne fera qu'établir la preuve, admissible mais pas nécessairement concluante, qu'on a commis une négligence pouvant conduire à des poursuites civiles, c'est-à-dire un manquement aux règles de soins qu'une personne raisonnable dans la position du défendeur aurait dû observer.

(f) *Actions en rupture de contrat et la Loi sur la vente des marchandises.* Quand une personne vend à une autre des marchandises, que ces marchandises soient définies de façon spécifique (par exemple, les 15 t d'avoine qui se trouvent en ce moment dans votre élévateur à Silver Plains) ou de façon générale (par exemple 12 t d'avoine fourragère nº1), la responsabilité du vendeur en ce qui concerne la qualité des marchandises livrées est régie par la législation des contrats, un ensemble complexe de règles codifiées depuis de nombreuses années, dans la mesure où de tels contrats de vente sont envisagés, par la *Loi sur la vente des marchandises.* Cette loi, à l'exception de quelques variations régionales mineures, existe essentiellement sous la même forme pour tout le Canada, et le Commonwealth.

Dans le présent contexte, sa portée essentielle est la suivante : les personnes qui achètent ou vendent des denrées agricoles entreposées sont libres de s'entendre sur les conditions de leur choix concernant la qualité des marchandises qui fait l'objet de la transaction. Mais dans une large mesure, les parties contractantes peuvent choisir de s'en remettre pour les détails aux conditions de la *Loi sur la vente des marchandises*, du fait qu'elle prévoit une série de garanties ou de conditions implicites de la part du vendeur, c'est-à-dire des promesses qu'un vendeur est supposé avoir faites à l'acheteur, que ces promesses soient expressément définies ou non. Ces promesses implicites sont les suivantes :

- une condition implicite que les marchandises correspondent bien à la description convenue;
- une condition implicite que les marchandises sont de qualité marchande (c'est-à-dire que même si elles sont d'une qualité défectueuse ou médiocre, elles sont au moins susceptibles de trouver un marché quelque part, comme marchandises de description identique à celle qui est utilisée dans la vente);
- une condition implicite que les marchandises sont propres à toute destination spécifique (par exemple l'alimentation des bovins), précisée par l'acheteur au vendeur au moment de la vente ou avant;
- [selon les cas] une condition implicite que les marchandises seront d'une qualité correspondant à celle de tout échantillon fourni par le vendeur à son acheteur éventuel.

Il est évident que ces conditions, en partie ou en totalité, ne s'appliquent plus dans les cas où les grains ou les produits agricoles se sont détériorés ou ont été contaminés en raison d'un entreposage défectueux; et il y a de nombreux cas où des experts ont été cités pour témoigner du caractère approprié ou non des mesures d'entreposage, ainsi que sur le degré de gravité des dommages causés aux denrées. Le type d'affaires que l'on retrouve le plus souvent dans ces litiges est celui où les fourrages et les provendes achetés par le vendeur ont provoqué des maladies ou porté préjudice à du bétail, à cause des mycotoxines qu'ils contenaient.

Actions judiciaires mettant en jeu des mycotoxines

Certains procès ont porté sur la quantité de mycotoxines que contenait un fourrage ou une provende. Ces mycotoxines avaient causé les symptômes de maladies observés chez les animaux. Par contre, d'autres poursuites ont été fondées sur des preuves inadéquates ou fausses, comme des résultats de laboratoire montrant des moisissures qui pourraient être toxiques. De telles preuves n'ont évidemment aucune valeur scientifique, mais entre les mains d'un bon avocat, elles risquent d'influencer un jury (Mirocha et Christensen, 1982). On ne connaît pas encore assez les mycotoxines. Comment les identifier, les détecter, observer leur développement sur différents substrats, mesurer leurs effets sur l'animal à des doses subcliniques? Une autre difficulté est d'obtenir de bons échantillons pour l'analyse des mycotoxines. À cause de ces difficultés techniques et scientifiques, un ou plusieurs experts cités comme témoins, quelquefois avec des points de vue opposés, peuvent se trouver impliqués dans des procès (Marshall, 1983). L'exemple suivant, qui s'est produit dans une province des Prairies du Canada (Schiefer et O'Ferrall, 1981), montre bien la nature compliquée des procès ayant trait aux maladies des animaux et aux mycotoxines.

L'exploitant d'une entreprise d'élevage de porcs (150 truies et 600 porcs de nourrissage) avait signé un contrat avec une compagnie d'aliments pour le bétail. Il s'agissait de plusieurs livraisons de différents types de granulés, contenant 75 % de grains et 25 % de divers suppléments de protéines, de divers mélanges et prémélanges de minéraux et de vitamines. Peu après une livraison de granulés, effectuée le 5 février 1976, les porcs commencèrent à

avoir la diarrhée et à vomir. Pour venir à bout de ce problème d'entérite, on ajouta des médicaments appropriés à la ration du 10 février et les symptômes disparurent. Ils réapparurent en mars après le retour à l'alimentation sans médicaments. Par la suite, on observa chez les truies matures et les jeunes truies pleines une enflure de la vulve et des mamelles, un accroissement des avortements et des portées moins nombreuses. L'exploitant refusa de payer. Le fabricant interrompit ses livraisons et poursuivit l'exploitant agricole pour non paiement des aliments reçus depuis février. L'exploitant agricole répliqua en poursuivant le fabricant, le tenant responsable des pertes causées par l'alimentation contaminée. On effectua un certain nombre d'analyses afin de trouver des mycotoxines dans la nourriture et dans les tissus des animaux, mais elles se révélèrent négatives et la cause de l'intoxication ne fut jamais clairement établie.

Dans le procès qui s'ensuivit, l'exploitant agricole, s'appuyant sur les déclarations de deux vétérinaires, soutint que la nourriture livrée en février et en mars était spécifiquement à l'origine du problème. Un vétérinaire avait diagnostiqué chez les animaux une hyperoestrogénie, probablement d'origine nutritionnelle, et peut-être causée par des mycotoxines. La recommandation de changer de nourriture avait rétabli temporairement la situation, jusqu'au moment où l'exploitant agricole avait recommencé à donner à ses animaux la nourriture en question.

Le fabricant fit remarquer qu'aucun des différents échantillons prélevés ne portait la moindre trace de mycotoxines après examens en laboratoire et que tous les grains contenus dans ses aliments avaient été achetés dans des régions reconnues pour n'avoir reçu que très peu de pluie avant ou pendant la récolte et que les grains provenaient de diverses sources à l'intérieur de la région. On avança que si l'on désirait envisager la responsabilité d'une mycotoxine, cette mycotoxine avait dû se développer dans la ferme, dans des installations d'entreposage ou de transport mal conçues. D'ailleurs, lors de plusieurs visites à la ferme, on avait pu observer la présence d'agglomérations considérables d'aliments mouillés et moisis causée par la pluie qui s'était infiltrée dans le revêtement de protection de l'auget.

La Cour estima que les problèmes qui s'étaient produits à la ferme avaient débuté au moment des livraisons d'aliments le 5 et 10 février et que tous ces problèmes, chez les porcs comme chez les truies, avaient les plus grandes chances d'être en rapport avec ces aliments. Le diagnostic d'hyperoestrogénie ne souleva que peu de doute, sans qu'on puisse cependant trouver de cause nutritionnelle. Le juge nota qu'il était impossible de dire avec certitude de quelle manière les mycotoxines éventuelles avaient pu se développer et décida que le fabricant d'aliments aurait à payer les frais relatifs aux deux livraisons défectueuses du 5 et du 10 février.

Schiefer et O'Ferrall (1981) ont passé en revue les aspects vétérinaires, toxicoanalytiques et juridiques de l'affaire. En ce qui concerne les *aspects vétérinaires*, ils ont estimé que si ce n'était pas les mycotoxines, une infection virale avait pu provoquer de l'entérite dans l'étable des porcs et que l'infection avait gagné l'étable des truies, provoquant des morts fétales *in utero*, des portées moins nombreuses et de l'infertilité chez un grand nombre de truies en recyclage hormonal. En ce qui concerne les *aspects toxicoanalytiques* de l'affaire, ils notèrent plusieurs fautes. De fait, les seuls échantillons recueillis en profondeur, à différents endroits, furent prélevés le 4 août, environ 4 mois après l'apparition des premières difficultés. De plus, la sensibilité des analyses de laboratoire qu'on avait fait pour détecter la mycotoxine zéaralénone laissait beaucoup à désirer. En ce qui concerne l'*aspect juridique*, après que l'exploitant eut entrepris des contre-poursuites en vertu de la *Loi sur la vente des marchandises* afin d'obtenir réparation pour des pertes résultant de la consommation d'aliments insalubres, le fabricant avait été forcé de défendre la qualité de ses livraisons, c'est-à-dire de prouver certains faits afin de gagner sa cause. Cependant, dans cette affaire, les autorités, c'est-à-dire le juge, ou le jury, ou les deux, après avoir mis les faits à l'épreuve et parce qu'ils devaient juger sur le fond, estimèrent, en se fondant sur le rapport de probabilités, qu'il était plus plausible que la nourriture donnée au bétail ait été responsable du préjudice plus que toute autre cause possible, et que par conséquent, selon toute probabilité, cette nourriture était insalubre. L'exploitant gagna donc son procès. Il ne fut pas obligé de payer le prix de la nourriture contaminée et, de plus, il fut dédommagé des pertes subies.

Cependant cette décision de la Cour en faveur de l'éleveur peut avoir été une application erronée de la règle générale sur les critères de la preuve dans les affaires civiles : en effet, la majorité des cas d'hyperoestrogénie chez les truies n'ayant pas reçu d'explication satisfaisante, la nourriture moisie donnée au bétail pouvait être tout autant la cause du problème.

Voici les importantes conclusions et recommandations que Schiefer et O'Ferrall (1981) ont tirées de cette affaire :

- Il est conseillé aux fabricants d'aliments du bétail de procéder à des tests pour la recherche des mycotoxines, soit sur le grain non traité, soit sur le produit final, en granulés ou en croquettes, d'une façon régulière, afin de s'assurer de la qualité de leurs produits.

- Les vétérinaires, les représentants des fabricants d'aliments et autres personnes intéressées doivent faire en sorte que les échantillons d'aliments du bétail soient prélevés convenablement, identifiés sans erreur possible et remis à des laboratoires d'analyse dignes de confiance.

- Tout nouveau cas de maladie doit faire l'objet d'une enquête approfondie et menée suivant différents points de vue.

- L'essai des aliments du bétail doit être pratiqué par des laboratoires reconnus, utilisant des méthodes ayant un pouvoir

de détection assez sensible pour déterminer qu'il n'y a pas de concentrations dangereuses de mycotoxines et leur identité doit être confirmée au moyen de méthodes chimiques appliquées par des analystes compétents.

- Les vétérinaires consultés par les fabricants d'aliments du bétail ***doivent savoir qu'il est difficile de contredire les allégations des propriétaires de bétail qui vont probablement témoigner qu'ils n'ont jamais constaté le moindre problème jusqu'au moment où ils ont commencé à nourrir le bétail avec l'aliment qu'ils ont reçu de la compagnie***. Ils doivent également, sans tarder, rassembler les éléments d'information disponibles et procéder aux essais nécessaires.

- Les vétérinaires consultés par le fermier doivent être conscients du fait qu'ils dépendent de la précision des descriptions fournies par le producteur et doivent, par conséquent, rassembler eux-mêmes tous les éléments d'appréciation disponibles.

- Dans un procès, on doit démontrer quantitativement qu'une toxine connue se trouve dans l'aliment à une concentration qui est en rapport direct avec la maladie des animaux (Pier et coll., 1980).

(g) *Responsabilité contractuelle.* Qu'un défendeur soit poursuivi pour négligence ainsi que nous l'avons examiné plus haut ou en vertu d'une responsabilité contractuelle, selon la *Loi sur la vente des marchandises*, cela dépend souvent de l'application du principe de la «relation contractuelle». Cette expression signifie que vous ne pouvez poursuivre ni être poursuivi en responsabilité contractuelle (y compris l'application de la *Loi sur la vente des marchandises*) que si vous êtes en relation contractuelle *directe* avec votre adversaire. Par exemple, si vous avez reçu d'un distributeur, d'un entrepreneur ou d'un détaillant régional indépendant, des marchandises entreposées insalubres, vous pouvez poursuivre cette personne ou cette compagnie en responsabilité contractuelle, mais pas le fabricant, du fait que vous n'avez pas traité directement avec ce dernier. Tout au plus, vous pouvez poursuivre le fabricant en responsabilité par négligence.

À ce sujet, nous pouvons citer plusieurs exemples dignes d'intérêt. Un cas de responsabilité contractuelle (comportant des rapports directs entre les partis), à la fois pour rupture de contrat et pour négligence, s'est présenté en Colombie-Britannique à la suite d'incendies ou d'explosions, prétendument causés par le peu de soins apportés à l'entreposage. Dans ce cas, cependant, les poursuites en responsabilité contractuelle du demandeur échouèrent. Ce cas était le suivant : *Cargill Grain Ltd.* c. *Neptune Bulk Terminals* (1984), 25 A.C.W.S. 244, une décision de la Cour d'appel de la Colombie-Britannique.

Dans un autre exemple, des granulés de son de blé, propriété d'une compagnie de grains, étaient entreposés sous contrat dans un magasin. Le contrat passé avec la compagnie de magasinage ne prévoyait qu'un entreposage, sans prévoir d'inspections ni de surveillance. Quelques mois après la livraison, les granulés commencèrent à s'échauffer. La compagnie de grains fut avertie par écrit que les granulés étaient humides et chauds, mais l'avertissement resta sans réponse; par la suite, un incendie éclata, causé par l'auto-inflammation de granulés humides. En déplaçant les granulés, on s'apercut qu'ils étaient infestés d'insectes. La compagnie de magasinage fit pratiquer des fumigations à deux reprises et, la deuxième fois, dut même démonter partiellement le bâtiment pour accéder à des lézardes. Le juge décida que toute perte subie par la compagnie de grains était causée par des marchandises en mauvais état, que par contre la compagnie de magasinage avait fait preuve d'une diligence suffisante dans la surveillance des dites marchandises, que la compagnie de grains avait commis une négligence en livrant des marchandises en mauvais état et que, par conséquent, elle était responsable à l'égard de la compagnie de magasinage.

En appel, on jugea que le premier juge avait fait une erreur en décidant que la *Loi sur les récépissés de magasins* (Colombie-Britannique) ne s'appliquait pas dans le cas de livraisons de marchandises en mauvais état, mais qu'il avait eu raison de décider que *la compagnie de magasinage avait satisfait aux règles de soins et de diligence requises par la loi, en considérant les éléments contractuels de l'affaire*. Se fondant sur sa conclusion que les granulés s'étaient infestés lorsqu'ils étaient en possession de la compagnie de grains, le juge avait eu raison de décider que la compagnie de grains avait manqué à son obligation de vérifier si les wagons de grains étaient infestés. On décida donc que la compagnie de magasinage était admise à recevoir de la compagnie de grains une réparation complète de ses dépenses et l'appel fut rejeté.

Dans un cas survenu en Louisiane, *Pellets Inc.* c. *Millers Mutual Fire Insurance Co.* (1971), 241 So. 2d 550 Louisiana C.A., la responsabilité contractuelle faisait également l'objet du litige, cette fois à cause d'une *installation défectueuse de protection de l'atmosphère inerte*. En 1967, une compagnie d'aliments du bétail de la Louisiane, produisant des granulés de cynodon, signa un contrat avec un entrepreneur en vue d'installer dans son exploitation un équipement comprenant un générateur de gaz inerte (sans oxygène). Des granulés furent entreposés dans quatre cellules de 15 x 21 m désignés par les lettres A-B-C-D et dans lesquelles des tuyauteries de ce gaz servaient à produire une atmosphère inerte destinée à conserver la teneur en vitamines des granulés, à diminuer les risques d'incendie par auto-inflammation. Au début du mois de décembre 1968, un incendie se produisit dans la cellule C et la compagnie d'assurance remboursa la perte puis résilia sa protection. À

la fin du mois de décembre 1968, un autre incendie se serait produit dans la cellule A, mais la compagnie d'assurance avait refusé de payer du fait qu'aucun incendie n'était visible le 2 janvier 1969, date de résiliation du contrat. La compagnie d'aliments pour le bétail poursuivit alors la compagnie d'assurance en réparation des pertes subies. Plusieurs parties devinrent alors des tiers défendeurs, y compris l'entrepreneur. Au tribunal, le verdict fut rendu en faveur de la compagnie d'aliments pour le bétail, mais la demande des tiers contre l'entrepreneur fut rejetée. La compagnie d'aliments pour le bétail fit alors appel du jugement.

À l'audience d'appel devant le jury, il fut établi que, le 6 janvier 1969, la température à une distance de 3,7 à 4,6 m mesurée à partir du sommet de la cellule A était de 107 °C. Le 27 janvier, la première flamme ou incandescence réelle fut aperçue dans des granulés déchargés à partir d'une soupape située près du bas de la cellule qui à ce moment était plus qu'à moitié vide. Pour vider la cellule plus rapidement, on pratiqua une ouverture à sa partie inférieure et l'on vit alors émerger une masse importante de braises incandescentes. À partir de ces faits et d'autres preuves, il fut déterminé qu'un incendie s'était indiscutablement produit dans la cellule A, le 27 janvier 1969, que le contrat d'assurance avait été résilié le 2 janvier 1969 de façon illégale et ineffective et que, par conséquent, la compagnie d'assurance était responsable des dommages provoqués par le feu.

Une deuxième partie de l'appel avait trait à une demande contre tiers faite par la compagnie d'assurance contre l'entrepreneur pour négligence commise dans la façon de concevoir et de construire la cellule A. Elle prétendait que l'entrepreneur avait mal prévu la ventilation de la cellule, négligeant d'installer des soupapes de sûreté, de rendre les transporteurs de granulés étanches, et lui reprochait de ne pas avoir prévu de canalisation de gaz inerte en plusieurs points de la cellule et enfin, de ne pas avoir installé de débitmètre ni de robinet d'inspection. L'essentiel de l'argumentation de la compagnie d'assurance reposait sur le raisonnement suivant : du fait que le générateur de gaz inerte était mal relié aux cellules d'entreposage, il s'était produit de la condensation entraînant l'introduction d'oxygène et d'eau dans le circuit du gaz. La Cour rejeta les demandes formulées contre l'entrepreneur parce que l'équipement destiné à être utilisé pour les cellules d'entreposage avait été installé par l'entrepreneur selon des plans fournis et approuvés par la compagnie d'aliments pour le bétail. Le contrat ne demandait à l'entrepreneur aucun travail de conception ou d'ingénierie.

Lorsque les dommages subis par un demandeur ont été en fait causés par une négligence dans la conception ou la construction d'une installation d'entreposage, et que cette installation ou équipement, avec ses défectuosités inhérentes, a été acheté indirectement, c'est-à-dire d'un intermédiaire et non du fabricant, le demandeur peut entamer des poursuites contre le fabricant, mais seulement au moyen d'une action en responsabilité par négligence, comme dans le cas précédent.

Ce chapitre avait pour but de définir et d'illustrer la plupart des formes de litiges auxquelles le lecteur peut faire face un jour, que ce soit à titre de partie ou à titre d'expert cité comme témoin. Par ailleurs, on y trouve des exemples de la plupart des catastrophes, des mésaventures et de quelques types d'erreurs de gestion qui peuvent se produire dans le domaine de l'entreposage des grains et qui peuvent être à l'origine de tels litiges. Mais il est impossible qu'une telle liste couvre la totalité des cas possibles, en aucune façon. Avant de clore ce chapitre sur les aspects juridiques de l'entreposage, penchons-nous sur un cas très spécial qui a été tranché par Lord Denning et la Cour d'appel anglaise en 1974, connu sous le nom de l'affaire *The Tres Flores*, [1974] 1 Q.B. 264. Un navire avait été affrété dans le but de transporter une cargaison de maïs de Varna, en Bulgarie, à Famagusta dans l'île de Chypre. Le navire arriva à Varna à 5 heures le dimanche 22 novembre 1970. Aucun poste d'amarrage n'étant libre, il jeta l'ancre dans la rade. À 10 heures, le capitaine fit savoir que son navire était prêt à embarquer une cargaison complète de maïs selon les conditions de l'affrètement. Le lundi 23 novembre, les affréteurs tenaient la cargaison de 6 500 t de maïs prête à l'embarquement sur les quais du port de Varna. Le navire se trouvait encore dans la rade et, en raison du mauvais temps, les inspecteurs furent dans l'impossibilité de se rendre à bord pour inspecter jusqu'au vendredi 27 novembre, jour où ils constatèrent que les cales étaient infestées et ordonnèrent de procéder à une fumigation avant l'embarquement. Le lundi 30 novembre, la fumigation dura 4,5 heures et, le 1er décembre, les affréteurs furent avisés que le navire était prêt à embarquer la cargaison. Aucun poste à quai ne fut accessible au navire jusqu'au 7 décembre, jour où commença l'embarquement qui dura jusqu'au 13 décembre 1970.

Les propriétaires du navire réclamèrent par la suite une indemnité de surestarie pour la période durant laquelle le navire était à l'ancre dans la rade (surestarie = une indemnité perçue pour le temps qu'un navire est immobilisé au-delà du jour convenu). Les armateurs prétendaient que l'escale avait commencé à 14 heures, le lundi 23 novembre, tandis que les affréteurs soutenaient qu'elle avait commencé le mardi 1er décembre 1970. Au procès, le juge trancha en faveur des affréteurs. Lorsque les armateurs firent appel de la décision, leur demande fut rejetée pour les raisons suivantes :

- l'affréteur avait prévu une condition préalable à la validité de l'avis d'acceptation d'embarquement, qui n'avait pas été remplie jusqu'au moment où la fumigation fut achevée, le 30 novembre;

- pour pouvoir donner avis qu'il est prêt à embarquer, le capitaine d'un navire doit être prêt à exécuter les instructions d'embarquement de l'affréteur

au moment où elles lui sont communiquées, et du fait que les cales de son navire étaient infestées ce qui les rendaient impropres à recevoir une cargaison jusqu'à exécution d'une fumigation, l'escale avait bien commencé le 1er décembre 1970 à 14 heures.

Nous ne savons pas quels insectes infestaient la cargaison en question. Si cette affaire n'est pas facile à classer dans une catégorie déterminée d'un point de vue juridique, c'est du moins un autre exemple qui montre que la négligence peut donner lieu à des procédures judiciaires excessivement coûteuses. Il est vraiment impossible de déterminer et de prévoir de façon exhaustive tous les types de situations dans lesquelles les qualités de compétence dans le domaine de l'entreposage des grains peuvent être mises en question par la loi.



Deuxième Partie

Caractéristiques d'entreposage de certaines denrées

Chapitre 10 Caractéristiques des denrées

Tandis que la première partie traite des principes intervenants dans la détérioration et l'échauffement des produits entreposés, la deuxième partie a pour objet les particularités et les problèmes de l'entreposage de certaines denrées. Pour des raisons de commodité, des caractéristiques de chaque denrée seront décrites dans l'ordre suivant : *risques relatifs d'entreposage*; *normes de teneur en eau*, avec des catégories de grains «sec», «gourd», «humide», «trempé» et «mouillé» établies par la réglementation de la *Loi sur les grains du Canada* et sujettes à des révisions périodiques; *les limites de teneur en eau* établies par le United States Department of Agriculture (1978); *les directives de conservation*; *les directives de séchage*, décrites en majeure partie par Friesen (1981) et Hall (1980); *les facteurs de déclassement pour détérioration et échauffement*, comme : échauffé, brûlé en cours d'entreposage, brûlé et pourri; *l'apparence des grains endommagés*, décrite par la Commission canadienne des grains (1987); et les *problèmes reconnus d'entreposage et/ou de séchage*. Ensuite, nous décrirons les problèmes rencontrés en cours d'entreposage pour chaque denrée, avec des détails relatifs aux études de cas et des méthodes de traitement utilisées.

Pour tout renseignement sur les caractéristiques d'un grand nombre de denrées et pour les problèmes qui s'y associent au cours de l'entreposage, de l'arrimage et du transport, le lecteur peut se reporter au *Lloyd's Survey Handbook* (Knight, 1985).

RISQUES RELATIFS D'ENTREPOSAGE

On trouvera au tableau 14, pour une série de denrées, cinq niveaux de risques d'entreposage et d'auto-échauffement. Le niveau de risque pour chaque denrée a été déterminé en fonction d'une évaluation générale de la taille des grains ou des particules, de la nécessité d'une atmosphère d'entreposage inerte, du contenu en huile totale, de la présence d'huile résiduelle et de l'histoire connue des problèmes d'entreposage. Le tableau 14 est une version remaniée et étendue du tableau 2 de la *National Fire Protection Association* (1949) et comprend les graines de soja, de colza, de canola, et autres produits.

DIRECTIVES DE CONSERVATION

La conservation d'une denrée dépend largement de sa teneur en eau (plus strictement de l'humidité relative de l'atmosphère intergranulaire) de sa température, de la durée de l'entreposage, ainsi que d'autres facteurs. Dans toute la mesure du possible, on trouvera pour chacune des 35 denrées décrites dans la deuxième partie, les renseignements concernant ces facteurs-clés, ainsi que la teneur en eau de la denrée en équilibre avec une humidité relative de 70 %, niveau au-dessus duquel les moisissures commencent à se développer. Pour des raisons de commodité, les données relatives à la teneur en eau et à l'humidité relative sont également résumées au tableau 15.

DIRECTIVES DE SÉCHAGE

À mesure qu'on augmente la température du courant d'air du séchoir, le séchage du grain va en s'améliorant; mais si cette température est trop élevée, le grain se détériore. Il est donc important de ne pas dépasser la température maximale fixée pour le grain en cours de traitement. La température maximale de séchage citée pour chaque denrée est fixée en sorte que le séchage ne s'effectue pas à plus de 1 % au-dessous de la teneur en eau prise comme norme des grains secs (à l'exception du colza et du canola) (Commission canadienne des grains, 1987); et on ne doit pas retirer plus de 6 % de teneur en eau en une seule phase dans un séchoir à grande vitesse. Avec des séchoirs dans lesquels le grain est exposé à la chaleur pendant de longues périodes, (comme dans les séchoirs de silos sans recirculation) il est particulièrement conseillé, pour le colza et le canola, d'utiliser des températures inférieures de 5 à 10 °C à celles qui sont fixées pour l'utilisation commerciale (Friesen, 1981). Les conséquences d'un séchage défectueux sont plus importantes avec certaines denrées qu'avec d'autres et les dommages ainsi provoqués peuvent réduire la valeur d'une denrée donnée pour certaines utilisations plus que pour d'autres. Enfin, les effets indirects d'un séchage défectueux peuvent être plus importants que les effets directs. La réduction de viabilité rend le grain plus sensible à l'invasion par les moisissures et/ou détériorations qu'elle entraîne. La friabilité entraînée par les effets d'une température de séchage excessive conduit à une augmentation de la brisure qui se produit en cours de traitement (Freeman, 1980).

DÉFINITIONS DES TERMES DE CLASSEMENT

Selon la Commission canadienne des grains (1987), voici les définitions des termes de classement :

Les *grains brûlés en cours d'entreposage* ressemblent beaucoup, quant à la couleur, aux grains brûlés. À la différence des grains brûlés, cependant, leur section apparaît lisse et vitreuse. Le poids d'un grain brûlé en cours d'entreposage est analogue à celui d'un grain sain, de taille comparable.

Des *grains brûlés* sont des grains carbonisés ou roussis par le feu. Si on les coupe transversalement, ils ont l'aspect du charbon de bois, avec de nombreuses cavités. À la différence du grain brûlé en cours d'entreposage, un grain brûlé pèse beaucoup moins qu'un grain normal de taille comparable.

Tableau 14 Risque relatif de détérioration, d'auto-échauffement dans les denrées entreposées

	Niveau de risque				
	Très élevé (classe 1)	Élevé (classe 2)	Modéré (classe 3)	Modéré-faible (classe 4)	Faible (classe 5)
Taille des particules/ graines	très faible	petite	petite/ grande	moyenne	moyenne
Type de produit	graines oléagineuses; produits à base d'herbe	farines contenant de l'huile; et de petites fibres	graines oléagineuses	céréales à forte teneur en huile	céréales, légumes
Fréquence des problèmes	très fréquents	fréquents	fréquents	assez fréquents	occasionnels
Besoin de gaz inerte	d'essentiel à préférable	non	non	non	non
Exemples	luzerne	grains de brasserie	canola, colza	alimentation bétail, porcs volaille	orge
	graine de pavot*	graines de maïs	graines de coton		sarrasin domestique
		coton	graines de moutarde domestique	maïs	féveroles
		farine de poisson	graines de lin	canola, colza	haricots
		foin	graines de carthame		lentilles
		son de riz	graines de soja		millet
			graines de tournesol		avoine
					arachides, pois riz seigle, criblures, sorgho, triticale blé
					son de blé, remoulages semoules

*essentiel

Tableau 15 Humidité relative en équilibre avec la teneur en eau et pourcentage de matières mouillées de graines et autres matières (d'après Hall, 1980; Henderson, 1985; Kreyger, 1972; Löwe et Friedrich, 1982)

Matière	Température (°C)	Humidité relative (%) 40	50	60	70	80	90	100
Graines								
Orge	25	9,7	10,8	12,1	13,5	15,8	19,5	26,8
Sarrasin	25	10,2	11,4	12,7	14,2	16,1	19,1	24,5
Coton	25	6,9	7,8	9,1	10,1	12,9	19,6	–
Haricots blancs petits et plats	25	9,6	11,0	12,6	15,0	18,1*	–	–
Haricots rouge sombre	25	9,6	10,7	12,5	15,0	18,6*	–	–
Graines de lin	25	6,1	6,8	7,9	9,3	11,4	15,2	21,4
Avoine	25	9,1	10,3	11,8	13,0	14,9	18,5	24,1
Pois verts	25–35	9,7	11,3	13,1	15,3	19,3	27,2	–
Pavot (opium)	25–35	5,9	6,9	8,0	9,5	11,7	17,0	–
Riz (non décortiqué)	25	10,9	12,2	13,3	14,1	15,2	19,1	–
Seigle	25	9,9	10,9	12,2	13,5	15,7	20,6	26,7
Maïs décortiqué	25	9,8	11,2	12,9	14,0	15,6	19,6	23,8
Sorgho	25	9,8	11,0	12,0	13,8	15,8	18,8	21,9
Soja	25	7,1	8,0	9,3	11,5	14,8	18,8	–
Blé								
blé tendre d'hiver	25	9,7	10,9	11,9	13,6	15,7	19,7	25,6
blé dur d'hiver	25	9,7	10,9	12,5	13,9	15,8	19,7	25,0
blé dur de printemps	25	9,8	11,1	12,5	13,9	15,9	19,7	25,0
durum	25	9,4	10,5	11,8	13,7	16,0	19,7	26,3
Autres matières								
Luzerne sèche	26	6,6	8,3	10,0	13,0	14,5	–	–
Son	21–27	–	–	–	14,0	18,0	22,7	38,0
Tourteaux de lin	21–27	–	–	–	13,5	17,5	23,5	40,5
Paille d'avoine	29	7,6	8,5	10,9	11,5	14,5	–	–
Granulés pour les porcs	25	9,4	10,6	12,2	14,0	17,0	22,7	–
Granulés pour les poulets de chair	25	–	–	–	13,0	–	–	–
Granulés pour bovins	25	–	–	–	13,0	–	–	–

*Chiffres incertains en raison du développement de moisissures

Les *grains chauffés* sont des grains qui ont la couleur, le goût et l'odeur caractéristiques des grains qui ont subi un échauffement spontané en cours d'entreposage, y compris les grains qui ont changé de couleur à la suite d'un séchage artificiel, mais non les grains carbonisés.

Les *grains pourris* sont ceux qui ont subi une décomposition ou une dégradation causée par des bactéries ou des champignons. On peut les identifier par le noircissement, le changement de couleur ou le ramollissement total ou partiel du grain.

Granulés de luzerne (*Medicago sativa* L.)

Risques relatifs d'entreposage : Très élevés

Normes de teneur en eau : Pas de normes au Canada, mais le manufacturier doit fixer la teneur maximale en eau présente.

Directives de conservation : D'une façon générale, éviter les teneurs en eau extrêmes : la teneur en eau appropriée est fixée entre 9 et 10 %, mais après traitement, elle peut s'abaisser entre 6,6 et 8,5 %. Les granulés sont tamisés avant

l'entreposage et la poussière qui en reste est mise en granulés pour améliorer la ventilation, éviter le gaspillage et réduire les risques d'incendie. Après refroidissement, les granulés sont entreposés dans de vastes silos qui peuvent contenir jusqu'à 810 t. De façon courante, on retire des silos pleins un chargement, qui permet d'éliminer les granulés sur le point d'être en mauvais état qui se trouvent près de la surface. Plus tard dans la saison, le silo est rempli à plein bord, en vue d'un entreposage à long terme (9 mois). Une aération sert à refroidir les granulés entreposés. On installe quelquefois un tuyau au sommet des cellules étanches, afin de répandre de l'azote destiné à maintenir la qualité du granulé et à éteindre les feux. Pour le transport, il est essentiel d'utiliser des wagons étanches (*National Fire Protection Association*, 1981).

Apparence : Les granulés obtenus à partir d'une luzerne de première coupe sont généralement beaucoup plus clairs et contiennent plus de graines de mauvaises d'herbes que ceux qui proviennent d'une luzerne de seconde coupe.

Problèmes d'entreposage : Lorsque s'est produit un échauffement prononcé ou un incendie, des granulés de luzerne déshydratés présentent des problèmes d'échauffement. Récemment, dans plusieurs cas, au Canada, après la découverte de problèmes d'échauffement, on a utilisé la méthode suivante :

- on a ouvert le silo et l'O_2 a stimulé le feu à son début, entraînant une production de fumée et de chaleur aboutissant à de graves pertes de produits;
- le silo a été aéré, mais les granulés se trouvaient déjà à un stade avancé d'échauffement et l'installation a été détruite par l'incendie;
- on a fait au silo un traitement d'azote, mais l'incendie est reparti dès que le produit a été retiré;
- le silo n'a pas été déchargé, du fait du blocage de l'auget, et une ouverture a été pratiquée à la base pour installer un auget extérieur. Ce dernier s'est obstrué à son tour et un ouvrier a essayé alors de le dégager avec un bâton qui fut rejeté violemment, blessant l'ouvrier.

Avec les granulés de luzerne entreposés, il est indispensable de prévenir l'apparition des problèmes en surveillant constamment l'état des granulés, en utilisant des cellules étanches, avec des tuyaux d'admission permettant de répandre du dioxide de carbone ou une quantité supplémentaire d'azote gazeux en cas de feu ou, de façon idéale, en entreposant les granulés en atmosphère d'azote gazeux ou autre gaz inerte. On peut retirer des silos le granulé en phase d'échauffement en se servant d'une chargeuse frontale pour retirer des tôles à la base de la cellule, puis en retirant le produit du tas qui s'est ainsi formé.

Étude de cas : en septembre 1987, de la fumée et de la vapeur s'échappaient du ventilateur de la toiture d'un silo de 810 t de granulés de luzerne dans une installation de l'ouest du Canada. Les granulés étaient entreposés depuis 1 ou 2 mois, au cours desquels la température des silos n'avait pas été vérifiée. On décida d'enlever tous les granulés non endommagés en pratiquant dans les parois du silo deux ouvertures au niveau du sol, une de chaque côté. Après avoir retiré 100 t de granulés, une explosion se produisit qui déplaça le ventilateur et le tuyau d'entrée des granulés et causa des dommages aux montants du toit (fig. 19*a*, 19*b*). Le feu noircit les parois et le toit au-dessus du niveau des granulés (fig. 19*c*). On réussit à maîtriser l'incendie en arrosant par l'ouverture du toit et en enlevant les granulés chauds par l'ouverture la plus large (225 x 130 cm). Plus tard, on pratiqua un autre trou dans la paroi afin de donner accès par le chargeur frontal. Tous les granulés ont subi des dommages, soit par le feu soit par la fumée.

Les pratiques de gestion utilisées

- L'évaluation de la teneur en humidité des granulés a été faite après le séchage et on a trouvé 10% d'humidité.
- On a enlevé les granulés périodiquement à l'aide d'un conduit aspirant fixé à la paroi la plus basse et branché au conduit d'entrée du toit.
- On a retiré les granulés en pratiquant des ouvertures dans les parois du silo avec une torche à l'oxyacétylène.
- On a maîtrisé l'incendie en arrosant sous pression par l'évent du toit au bout d'une grande échelle mécanique et en enlevant les granulés brûlés et moisis par les ouvertures des parois.

Bonnes méthodes

- On devrait tamiser les granulés avant l'entreposage afin d'enlever les poussières et les déchets, d'améliorer la circulation d'air et de réduire les risques d'incendie.
- On devrait déterminer la teneur en eau à partir d'échantillonnages périodiques afin de connaître la teneur maximale en eau et les dangers possibles.
- On devrait surveiller avec soin la teneur en eau et la température des stocks entreposés et on devrait enregistrer les données pour s'y référer plus tard.
- On devrait installer les thermocouples dans le silo.
- On devrait aérer les stocks afin d'avoir la même température et la même humidité pour tous les stocks.
- On devrait installer des conduits d'entrée afin d'envoyer des quantités supplémentaires de CO_2 et N_2 sur le silo pour l'entreposage de granulés ou la maîtrise d'incendie.
- On aurait dû avoir recours à l'avis d'un expert lorsqu'on a remarqué de la fumée.

- On aurait dû éteindre l'incendie en le recouvrant de CO_2 par le conduit d'entrée de 15 cm de diamètre au-dessus et par d'autres trous pratiqués dans les parois.

- On devrait sceller le silo pour empêcher l'air d'y entrer et faire sortir les gaz sous pression.

- On ne doit pas arroser des stocks brûlés, car de l'oxygène peut s'y introduire et créer un risque d'explosion (National Institute for Occupational Safety and Health, 1985).

- On doit laisser refroidir le contenu d'un silo avant de l'enlever.

- On ne doit pas pratiquer de trous dans les parois du silo lorsque le feu couve parce que l'oxygène peut s'y introduire et ainsi créer un risque d'incendie et d'explosion (fig. 18*c*).

- On doit pratiquer les trous en utilisant une scie à métal et non une lampe à découper à moins que le silo soit vide (Harvestore® Products, 1982).

Orge (*Hordeum vulgare* L.)

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau :
Sec : jusqu'à 14,8 %

Gourd : de 14,9 à 17,0 %

Humide : au-dessus de 17 %

Directives de conservation : Pour la conservation de l'orge, la teneur en eau maximale doit être de 13 % pour 1 an d'entreposage et de 11 % pour 5 ans (Hall, 1980). De l'orge avec une teneur en eau initiale comprise entre 10,3 et 12,1 % et ensilé entre 22 et 35 °C s'est conservée en bonne condition sans augmentation des acides gras libres pendant 3 ans dans les silos d'une ferme du Manitoba (Sinha et Wallace, 1977). Dans un laboratoire, de l'orge s'est conservée pendant 18 mois avec une teneur en eau inférieure ou égale à 13,2 %, sans être envahie par les champignons, selon Tuite et Christensen (1955). Par contre, des grains à teneur en eau juste au-dessus de 14 % et au-dessous ont été envahis par l'*Aspergillus restrictus*, une variété à croissance lente du groupe de moisissures d'entreposage *A. glaucus*, après plusieurs mois d'entreposage. Burrell (1970) a délimité les combinaisons teneur en eau-température qui peuvent laisser prévoir des problèmes de détérioration par les moisissures et d'infestations par les acariens dans l'orge entreposée sur une période de 32 semaines dans les conditions des fermes du Royaume-Uni. Il a montré que de l'orge maltée de grande valeur avait besoin d'être séchée jusqu'à une teneur en eau de 12 % et d'être refroidie afin d'éviter le risque d'infestation par des acariens.

Directives de séchage : Les températures de séchage maximales sont de 45 °C pour l'orge de semence ou de maltage, de 55 °C pour usage commercial et entre 80 et 100 °C pour la nourriture du bétail (Friesen, 1981). Cependant des producteurs de malt canadien préfèrent que l'orge qui leur est destinée ne soit pas séchée par le producteur.

Facteurs de déclassement : L'orge est déclassée numériquement quand elle contient une forte proportion de grains brûlés en cours d'entreposage, chauffés ou pourris, ou qu'elle a une odeur d'échauffement ou de brûlé. L'orge est classée dans la catégorie *Échantillon*, si elle contient plus de 0,5 % de grains brûlés en cours d'entreposage ou si elle a une odeur de brûlé, si elle contient plus de 10 % de grains chauffés ou si elle a une odeur distincte d'échauffement, ou si elle contient plus de 10 % de grains pourris. Lorsqu'il y a à la fois des grains chauffés et pourris, on tient compte des deux.

Apparence des grains chauffés : La glume qui recouvre le germe change souvent de coloration pour prendre une couleur brun doré. Quand la glume est retirée par l'opération mécanique de perlage, le germe apparaît de couleur rouge ou brune. À mesure qu'augmente le degré de détérioration par la chaleur, on voit apparaître une plus grande proportion des grains perlés qui sont de couleur rouge acajou à brun.

Tableau 16 Évaluation du nombre de semaines de conservation de l'orge avant l'apparition d'une diminution de la germination (d'après Kreyger, 1972)

Teneur en eau (% de base humide)	11	12	13	14	15	16	17	19	23
Température d'entreposage (°C)	Nombre maximum de semaines de conservation en entreposage								
25	54	39	25	16	9	5	2,5	1	–
20	110	80	50	32	19	10	5	2	0,5
15	240	170	100	65	40	20	10	4	1
10	600	400	260	160	90	50	21	8,5	2
5	>1000	1000	600	400	200	120	50	17	4

Problèmes d'entreposage : Le grain fraîchement moissonné avec une teneur en eau dépassant 14 % risque de s'échauffer et de s'avarier. Il suffit d'un développement modéré des moisissures nuisibles pour détruire la faculté de germination de l'orge et lui donner une odeur de moisi. L'orge qui est destinée à la semence ou au maltage demande une surveillance étroite et des soins spéciaux en cours d'entreposage (Dickson, 1959). Toute élévation de température notable se produisant dans de l'orge en cours de maltage est considérée comme un signe indicateur de problèmes (Christensen et Kaufmann, 1972). Le tableau 16 indique le nombre de semaines après lesquelles on estime que se produit une diminution des facultés de germination de l'orge avec une teneur en eau comprise entre 11 et 23 %, entreposé entre 5 et 25 °C (Kreyger, 1972).

Une détérioration de l'orge trempée (de 23 à 40 % de teneur en eau) peut se produire dans des silos étanches ou non étanches, ainsi que dans des structures contenant des grains traités à l'acide. Dans les silos étanches, l'air peut pénétrer en cours de rechargement par le sommet tandis que le grain est retiré par la partie inférieure, ce qui entraîne des risques de moisissures et d'échauffement (Nichols et Leaver, 1966). Dans des silos non étanches à membrure de béton, la détérioration se produit dans le grain des couches supérieures, lorsque l'obturation au moyen d'herbes sèches ou d'une feuille de plastique est inappropriée, ou lors qu'on retire moins de 7,5 cm de grains chaque jour (Lacey, 1971). Une détérioration peut également se produire dans de l'orge à forte teneur en eau traitée à l'acide propionique ou autre, lorsqu'on emploie un acide inapproprié ou lorsque se produit une condensation qui dilue le traitement acide.

Étude de cas : 1. En Grèce, de l'orge contenant en moyenne de 13,5 à 14,5 % d'eau avait été entreposée dans les silos d'une brasserie. Le contenu d'un silo s'était échauffé jusqu'à 40 °C et la germination des graines s'était trouvée réduite en raison de l'activité de champignons nuisibles du groupe *Aspergillus glaucus*. Le problème à résoudre était d'éviter la détérioration et l'échauffement ainsi que la perte de faculté de germination d'une orge provenant de plusieurs fermes, avec diverses teneurs en eau et à des températures différentes. L'usine était équipée d'un dispositif d'aération qui ne parvint qu'à produire une condensation dans les silos, aggravant la situation. Le problème fut résolu en retournant l'orge de façon à distribuer également l'humidité et la température du grain (De Vries, communication personnelle).

2. Au cours de l'automne humide et prolongé de l'année 1977, dans l'Ouest canadien, des masses considérables de grains furent empilées sur le sol, avant de subir un séchage artificiel et d'être entreposées en silo. On étudia avec soin les modifications écologiques qui se produisirent avec le temps. On observa qu'un tas d'orge germée vieux de 6 semaines comportait des habitats écologiques favorisant le développement de champignons particuliers. Des échantillons prélevés des parties sud et ouest du tas, chauffées par le soleil, contenaient surtout des *Alternaria* (champignon des champs), et de très faibles niveaux de *Penicillium*, accompagnés d'un faible niveau de dioxyde de carbone; les échantillons prélevés dans les parties nord et est avaient les plus forts niveaux d'espèces du groupe *Aspergillus glaucus*, tandis que les échantillons prélevés au centre avaient de faibles niveaux d'*Alternaria*, des niveaux élevés de *Penicillium* et quelques traces de *A. glaucus*, avec une teneur en eau plus élevée et une plus faible germination (Mills et Wallace, 1979).

3. Un navire des Grands Lacs, à auto-déchargement, rempli d'orge, était resté amarré au port de Montréal tout au long de l'hiver. Au printemps, on nota que le contenu d'une cale était gravement endommagé et échauffé, laissant échapper de la cargaison de fortes odeurs de décomposition ainsi que de la vapeur. À la partie inférieure de la cargaison, on trouva des blocs de grains agglomérés, rouges et brûlants ainsi qu'une couche d'eau. Une lampe restée allumée dans la cale était à l'origine de ces détériorations.

Malt d'orge (*Hordeum vulgare* L.)

Le malt est de l'orge germée, grillée et vieillie.

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Directives de conservation : Le malt est grillé dans un courant d'air sec très chaud, puis on l'entrepose après avoir ou non retiré les parties sèches et friables. Le malt sec reste stable en cours d'entreposage, en raison de sa faible teneur en eau qui varie, suivant les cas, de 1,5 à 7 %. À la différence de l'orge, on l'écrase facilement (Briggs, 1978). Des quantités considérables de malt sont expédiées d'Europe et d'Amérique du Nord à destination de brasseries éloignées. Il arrive que ce malt fortement hygroscopique se détériore en cours de traversée lorsqu'il se trouve exposé à l'humidité. L'agglomération en blocs compacts, provoquée par des champignons nuisibles, a été étudiée par Okagbue à l'arrivée d'une cargaison destinée à une brasserie du Nigeria (1986). Christensen et Meronuk (1986) ont étudié les problèmes associés à la présence du champignon des champs *Fusarium* et du champignon d'entreposage *Aspergillus versicolor* dans de l'orge en cours de maltage.

Étude de cas : En mars 1983, du malt préparé avec une teneur en eau de 4,2 % avait été entreposé dans un silo de béton, dans une malterie de l'Ouest canadien. Après 5 semaines environ, on avait retiré trois charges du silo, avec des prélèvements contenant des traces de malt brûlé. On déchargera partiellement la cellule atteinte et on y trouva du malt chauffé et du malt non chauffé. La teneur en eau du malt chauffé variait entre 7 et 10,4 %. Il y avait également des points chauds. L'origine de la détérioration fut attribuée à une forte pluie qui s'était produite au moment du chargement, alors que la cellule était pleine au tiers. L'eau s'était écoulée à partir d'une large ouverture jusqu'à la

partie inférieure et était entrée dans la cellule, sans qu'on s'en aperçoive, par l'élévateur à godets et la courroie du transporteur. Par la suite, la cellule fut remplie avec du malt.

Les grains de brasserie et de distillerie

Les *grains de brasserie* sont les résidus insolubles provenant du malt brassé; les *grains de distillerie* sont les résidus provenant de la fabrication des boissons alcooliques par distillation des grains.

Risques relatifs d'entreposage : Avec les grains de brasserie et de distillerie, les risques d'incendie sont élevés.

Normes de teneur en eau : Au Canada, il n'existe pas de normes de teneur en eau pour les matières séchées ou non séchées, mais le manufacturier est tenu par la *Loi sur les aliments du bétail* de déclarer la teneur en eau maximale.

Directives de conservation : Normalement, les grains de brasserie contiennent environ 11 % d'eau en poids et ils sont vendus à l'état humide pour être utilisés directement comme aliments du bétail, mais on le vend également à l'état sec. Les grains secs sont soit utilisés directement comme fourrage soit incorporés dans les mélanges. Quand les grains de brasserie et de distillerie sont entreposés à l'état sec en grande quantité, il se produit quelquefois des inflammations spontanées. À l'état sec, les grains de brasserie réagissent de façon exothermique avec l'oxygène ou l'air secs. La chaleur est produite par l'oxydation de l'huile naturelle qui se trouve dans les grains (Walker, 1961). La National Fire Protection Association (1981) a établi que la teneur en eau des grains de brasserie et de distillerie séchés doit être de 7 et 10 % et, qu'avant d'être entreposés, les grains doivent être refroidis au-dessous de 38 °C et qu'il est très dangereux de les sécher au-dessous de 5 % de teneur en eau. D'après Snow et coll. (1944), le niveau sans danger de teneur en eau pour les grains de distillerie est de 11 % (équivalant à 72 % d'humidité relative) pour un entreposage de 3 mois, et de 9,8 % (65 % d'humidité relative) pour un entreposage de 2 à 3 ans à des températures comprises entre 15,5 et 21 °C.

Canola/Colza (*Brassica campestris* L.; *B. napus* L.)

Canola est le nom utilisé au Canada pour les cultivars de *Brassica campestris* et de *B. napus* à faible taux d'acide érucique et de glucosinolate. Le mot *colza* est utilisé à l'extérieur du Canada pour décrire toutes les variétés cultivées de *B. campestris* et de *B. Napus* mais, au Canada, il ne s'applique qu'aux cultivars aux taux élevés d'acide érucique. Les conditions d'entreposage du canola et du colza sont similaires.

Risques relatifs d'entreposage : Modérés

Normes de teneur en eau :
- Sec : jusqu'à 10 %
- Gourd : de 10,1 à 12,5 %
- Humide : au-dessus de 12,5 %

Directives de conservation : La conservation des graines de canola/colza entreposées demande le plus grand soin, car la limite supérieure de la teneur en eau des graines appelées «sèches» est actuellement de 10,0 %. Pour la conservation à long terme, ce chiffre est trop élevé, car la croissance des champignons nuisibles du groupe *Aspergillus glaucus* se produit à 70 % d'humidité relative, équivalente à une teneur en eau de 8,3 %, à 25 °C. Si les graines sont ensilées à des températures dépassant 25 °C, ou s'il se présente des poches de graines immatures ou de graines de mauvaises herbes, une teneur en eau même égale à 8,3 % sera trop élevée pour la conservation à long terme. Selon une règle approximative, pour une conservation dépassant 5 mois, le canola doit être ensilé avec une teneur en eau ne dépassant pas 8,0 %. Le tableau de la figure 1 permet de prévoir les conditions de conservation des graines de canola/colza pendant une période de 5 mois, selon diverses combinaisons températures-teneur en eau (Conseil canadien du canola, 1981; Mills et Sinha, 1980). Si la température ou la teneur en eau des graines récoltées tombent à l'intérieur d'une zone de détérioration du tableau, l'agriculteur doit prendre des mesures pour réduire un facteur ou les deux. Pour obtenir de bonnes conditions de conservation, il faut :

- ensiler les grains avec une teneur en eau inférieure d'au moins 1,5 points au-dessus de la limite de 10,0 %;
- utiliser un déflecteur efficace sous l'auget, de façon à disperser loin du centre les matières vertes plus lourdes et plus humides, ainsi que les particules fines;
- nettoyer les grains aussitôt que possible;
- se servir d'une unité d'aération pour refroidir rapidement les graines à la température de 5 °C ou 0 °C pour la période d'entreposage d'hiver;
- et surveiller la température des graines à intervalles de quelques jours pendant la durée de l'automne et, pendant l'hiver, toutes les 2 semaines.

Repasser à l'auget les graines non aérées, si elles ont été entreposées pendant 3 à 5 jours, de façon à briser toute poche de graines de mauvaises herbes et de déchets qui risqueraient de favoriser l'échauffement et de façon à former un cône inversé qui favorise la pénétration de l'air. La graine de canola/colza est plus vulnérable que l'orge à l'infestation par des organismes nuisibles lorsqu'elle se trouve entreposée dans des silos de ferme (Sinha et Wallace, 1977).

Directives de séchage : Les températures de séchage maximales sont de 45 °C pour les graines de colza/canola destinées à la semence et de 65 °C pour celles qui sont destinées à l'usage commercial, à condition qu'au moment du séchage la teneur en humidité ne soit pas inférieure à 7,5 %. Quand les graines canola/colza sont exposées à la chaleur pendant une durée prolongée, comme dans les séchoirs de silo sans recirculation, il est conseillé de prévoir des températures inférieures de 5 à 10 °C à celles qui sont recommandées pour l'usage commercial. En effet, la qualité de l'huile obtenue est

altérée par une longue exposition aux températures élevées (Friesen, 1981). Les graines endommagées subissent une baisse de qualité de l'huile à cause de l'élévation prononcée du niveau des acides gras libres (Nash, 1978).

Facteurs de déclassement : Les graines de canola/colza sont déclassées numériquement quand elles contiennent une trop forte proportion de graines chauffées, brûlées en cours d'entreposage, et qu'elles ont une odeur d'échauffement ou de brûlé. La graine de canola/colza est classée *Échantillon* si elle contient plus de 2,0 % de graines chauffées ou si elle présente une odeur distincte d'échauffement ou de brûlé.

Apparence des graines chauffées : Les graines sont écrasées en bandes de 100 graines (Conseil canadien du canola, 1974), afin de déterminer l'étendue de l'échauffement que l'on classe de la façon suivante : *noir fusain* (très brûlé en cours d'entreposage), *brun chocolat foncé* (nettement chauffé) et *brun roux clair* (légèrement endommagé par l'oxydation). Les limites fixées pour les graines endommagées par la chaleur qui sont stipulées dans les catégories réglementaires correspondent aux graines fusain ou brun chocolat foncé. Les échantillons contenant des graines de couleur brun roux clair font l'objet d'une vérification soigneuse de leur odeur, s'appliquant à la fois à la masse de l'échantillon et aux graines fraîchement écrasées en bande. S'il y a une odeur ou si cette odeur est associée avec des graines écrasées noires ou brunes, les graines de couleur brun roux clair sont considérées comme chauffées. En l'absence de ces symptômes, des graines de couleur brun roux clair sont classées comme endommagées.

Les graines de canola de couleur fusain noir (fig.17*c*) et brun chocolat foncé lorsqu'elles sont écrasées donnent une huile de canola foncée (fig.18*c*).

Problèmes d'entreposage : Après entreposage, la graine de canola/colza passe par une période de respiration active. Si la chaleur et l'humidité dégagées par la respiration ne sont pas très vite éliminées, il se produit rapidement une croissance et une respiration des moisissures. Pour neutraliser cette situation, il faut aérer ou retourner les graines aussitôt que possible. Si une partie ou la totalité des graines ont une teneur en eau plus élevée, il est nécessaire de les sécher, puis de les aérer. ***Ne pas considérer les graines de canola entreposées comme étant similaires à du blé ensilé, car à la différence du blé, les graines de canola peuvent subir très rapidement des modifications nuisibles.***

Problèmes de séchage : Un volume de graines de canola/colza entreposées est beaucoup plus dense qu'une masse similaire de graines céréalières entreposées, et elles présentent une résistance plus élevée au déplacement de l'air. Pour forcer une masse d'air de séchage à travers des graines de canola, il faut employer une pression statique deux à trois fois plus élevée que pour sécher du blé. Du fait que la conception d'un grand nombre de ventilateurs de séchage ne permet pas d'obtenir des modifications de la pression de l'air qu'ils produisent, il résulte que leur débit d'air est inférieur lorsqu'on les emploie à sécher des graines de canola. Un débit d'air inférieur signifie une énergie inférieure pour chauffer l'air et l'amener à la température de séchage choisie. Il faut donc prendre soin de réajuster la température lorsqu'on passe du séchage d'une céréale au séchage du canola, car un plus faible débit d'air signifie un temps de séchage plus long, avec la possibilité d'une accumulation de température (Conseil canadien du canola, 1981).

Les moisissures et l'échauffement peuvent se développer extrêmement vite dans les graines de canola/colza humides et, aux endroits où se produisent ces phénomènes, les graines ont une forte tendance à s'agglomérer (fig. 17*b*). Il en résulte une baisse considérable de valeur du produit entreposé, provoquée par une augmentation marquée du niveau d'acides gras libres, probablement associée au développement des moisissures (Nash, 1978). Burrel et coll. (1980) ont déterminé le temps que demandait l'apparition de moisissures à la surface de graines de colza en cours de séchage, à cinq niveaux de températures et sept niveaux de moisissures. Ils ont observé que l'agglomération des graines précédait l'apparition à l'oeil nu de colonies de champignons et que la germination était inhibée beaucoup plus tard. Par exemple, des graines à 25 °C avec une teneur en eau de 10,6 % s'étaient agglomérées après 11 jours et les colonies de champignons n'étaient apparues que 21 jours après, tandis que la germination restait intacte après 40 jours.

Étude de cas : 1. En août 1976, un fermier dans la région d'Interlake au Manitoba avait rempli de graines de colza un silo de 68 t. Le colza entreposé au cours d'une journée extrêmement chaude contenait de 8,5 à 9,0 % d'eau. À la fin du mois d'octobre, on découvrit un point chaud au centre de la cellule s'étendant vers le bas à environ 120 cm de la surface. En raison du temps extrêmement chaud, il s'était produit une forte quantité de particules fines qui s'étaient accumulées au centre du silo. Le phénomène d'échauffement qui se produisait dans le colza déjà chaud se trouvait donc aggravé par une grande quantité de particules fines. Dès qu'elles furent découvertes, les matières échauffées furent immédiatement retirées et le reste du chargement se conserva sans incident. Pour éviter l'apparition future de problèmes de ce genre, le fermier installa un système d'aération, mis en route par un humidistat, se déclenchant au niveau d'humidité relative de 40 % ou moins. Cette aération fut mise en marche dès le moment où les premières graines furent introduites dans le silo jusqu'à l'hiver où elle fut arrêtée. Une sonde thermométrique à indication numérique fut également utilisée pour vérifier la température des matières ensilées à intervalles de quelques jours au cours de l'automne et, l'hiver, toutes les 2 semaines. Le fermier ne rencontra par la suite aucun problème d'entreposage (Lyster, 1978).

2. À l'automne 1985, un fermier de la région de Winnipeg (Man.) avait rempli de canola un silo de 64 t. Au cours de l'hiver qui suivit, il se produisit une détérioration et un échauffement. Les matières entreposées ne purent être déchargées, car l'auget se trouvant à la base du silo était obstrué par des graines agglomérées. Le problème fut résolu en déplaçant par aspiration (fig. 11) à travers l'orifice supérieur de ventilation les graines sèches s'écoulant librement au-dessus des matières agglomérées; puis, on évacua ces dernières de la même manière. Le fermier se servit d'un boyau flexible de 12,5 cm de diamètre, relié à une unité portative de vide d'une puissance de 70 cv (52 220W). Il lui fallut 6 heures au total pour décharger complètement sa cellule.

3. En 1975, un wagon de bois fermé, rempli de colza gourd et humide, fut envoyé à l'unité de séchage d'un des élévateurs terminaux. Malheureusement, ce wagon fut dérouté sur une voie de garage pendant 3 mois, et, lorsqu'on l'ouvrit, les matières qu'il contenait étaient d'une couleur gris très clair et se désintégraient dès qu'on les touchait. Elles s'étaient échauffées jusqu'au point d'être réduites en cendres : c'était une perte totale. Cependant les parois de bois du wagon étaient intactes. (Note : des graines noircies auraient été le signe d'une combustion incomplète).

Aliments pour le bétail, à base de canola/colza (voir définition et usage des termes canola et colza).

Risques relatifs d'entreposage : Modérés à faibles

Normes de teneur en eau : Le manufacturier garantit que les granulés n'ont pas une teneur en eau supérieure à 11 %.

Directives de conservation : Les niveaux sécuritaires de la teneur en eau pour l'entreposage de l'aliment sont 7 %, à 30 °C ou 9,5 % en bas de 25 °C pour un an (White et Jayas, 1988). La décoloration de l'aliment d'un vert jaunâtre au brun se produit après 1 mois d'entreposage à une teneur de 10 %, à 50 °C. Cette décoloration survient après 3 mois pour l'aliment à une teneur de 10,4 et 11,5 %, à 40 °C, et à différentes teneurs en eau, soit de 6,3 à 11,5 %, à 50 °C.

Problèmes de conservation : L'huile, l'hexane et autres solvants qui restent dans les farines et dans les granulés après extraction de l'huile constituent un risque de feu et d'explosion en cours de transport par bateau. Les niveaux d'huile et de solvants résiduels permis sont réglementés par la Garde côtière canadienne (1984). Les farines et granulés de canola/colza qui ont fait l'objet d'une extraction par solvant et qui contiennent moins de 4 % d'huile ou 15 % d'huile et de teneur en eau combinées et pratiquement libres de solvant inflammable ne contreviennent pas aux réglementations, à condition qu'elles fassent l'objet d'un certificat provenant d'une autorité reconnue.

Aliments pour bétail, porcs et volaille

L'alimentation des animaux, qu'elle soit complète ou limitée à des utilisations particulières se présente sous forme de farine, de granulés et de croquettes. La formulation de ces aliments est complexe et peut contenir du maïs et/ou d'autres céréales, des oléagineux comme la farine de soja, des graisses comme le saindoux, des mélanges de vitamines, de minéraux et autres produits.

Risques relatifs d'entreposage : Modérés à faibles

Normes de teneur en eau : Il n'existe pas au Canada d'obligation d'étiquetage de la teneur en eau pour les aliments destinés au bétail, aux porcs ou aux volailles contenant plus d'un composant.

Directives de conservation : D'une façon générale, on doit éviter les teneurs en eau trop faibles ou trop fortes (National Fire Protection Association, 1981); garder la teneur en eau entre 10 et 14 %. L'industrie considère cette teneur sécuritaire pour l'entreposage des aliments destinés aux animaux. Cette teneur en eau intéresse les manufacturiers surtout dans la mesure où elle conditionne l'efficacité du processus de granulation et où elle joue un rôle dans la conservation des granulés. Surveiller le réchauffement excessif qui peut se produire au cours de la mouture des céréales plutôt qu'au cours de la granulation et au cours de la granulation de certains aliments concentrés contenant de hauts niveaux de protéines et de gras animal.

Les mesures de précaution à observer pour l'entreposage et l'utilisation des aliments et des granulés sont les suivantes : observer les variations d'écoulement pouvant indiquer un accroissement d'humidité et un début de détérioration; rechercher les déplacements d'humidité et le développement de moisissures qui se produisent au sommet et sur les côtés de la cellule; vérifier les fuites qui peuvent se produire par les trous laissés par les boulons manquants ou des défauts de soudure; acheter les aliments en fonction de l'usage qu'on en fait, c'est-à-dire éviter de les laisser séjourner trop longtemps; ne jamais placer des aliments frais au-dessus d'aliments plus anciens; toujours nettoyer soigneusement les cellules dès qu'elles sont vides en faisant suivre ce nettoyage d'un rinçage au moyen d'une solution diluée de Chlorox®, de façon à tuer les spores des moisissures. En 1985, Henderson a étudié les rapports entre la teneur en eau et l'humidité relative à l'équilibre, à 5, 15 et 25 °C, de trois variétés d'aliments et de granulés pour porcs constituées essentiellement de farine d'orge et de dérivés du blé en proportions diverses avec des farines de soja, et il a noté que ces chiffres étaient similaires. La teneur en eau en équilibre avec une humidité relative de 70 % à 25 °C était d'environ 14 %, un chiffre analogue à celui des grains de céréales. Pour la plupart des utilisations pratiques, les rapports entre teneur en eau et humidité relative à l'équilibre de l'orge, du blé et des aliments pour animaux contenant 80 % ou plus des produits céréaliers, comme les aliments pour les porcs, peuvent être considérés comme similaires. Cependant, si l'alimentation animale contient plus de 18 % d'une graine oléagineuse, comme la farine de soja, on peut s'attendre à ce que l'humidité relative à l'équilibre soit plus élevée, ce qui

demande une teneur en eau plus faible en vue d'une bonne conservation.

Clancy (1979*a*, 1979*b*) donne des caractéristiques d'entreposage (teneur en eau, capacité d'écoulement, capacité d'agglomération, densité en vrac et hygroscopicité) d'un certain nombre d'aliments pour bétail dans les conditions en usage au Royaume-Uni. Voici les produits décrits : graines de coton, graines d'arachides, flocons de noix de coco, farine de soja, granulés de pulpes de betteraves, cubes d'herbes, graisses et mélasses. Les produits qui contiennent une forte proportion de mélasse ont une faible faculté d'écoulement. Hamilton (1985) décrit le problème de la moisissure et les facteurs qui influent sur l'activité des champignons et des agents antifongiques dans les aliments pour volaille.

Étude de cas : En Allemagne de l'ouest (Dinglinger, 1981), dans un gros silo contenant des granulés pour le bétail, un feu sans flamme s'était développé à la suite d'un phénomène d'auto-inflammation. Pour commencer, les pompiers tentèrent de remplir l'espace libre au-dessus des granulés avec de la mousse de CO_2, mais les concentrations de CO_2 dans les espaces de travail situés à la base du silo atteignirent des niveaux dépassant de beaucoup les limites de sécurité. Lorsqu'on tenta de vider le silo, on ne put dégager que la partie inférieure. Un pont s'était formé à la hauteur de 15 m, à proximité de la poche de feu, laissant environ 150 t de granulés suspendues dans la partie supérieure du silo. Afin de faire écrouler le pont, on pratiqua un trou d'environ 50 cm de diamètre. Comme on n'avait pas pu fermer complètement la glissière de décharge à la base du silo, il se forma à l'intérieur du silo un fort courant de convexion attirant l'air extérieur par l'intermédiaire des fuites, en quantité suffisante pour maintenir le feu en activité. Une lance fut montée dans la glissière de décharge (fig. 14) par laquelle on répandit de l'azote (N_2) dans le silo, à partir d'un cylindre-réservoir relié à un boyau normal de lutte contre l'incendie. Après cette purge au moyen de N_2, l'oxygène restant dans le silo à la source du feu fut réduite à la proportion de 7 %, insuffisante pour alimenter la zone de feu, qui se refroidit lentement, en réduisant ainsi les risques pour les pompiers. En raison de la faible concentration d'oxygène dans le silo, on avait complètement éliminé le danger d'une explosion en provenance des poussières qui se serait produite si le pont s'était effondré en cours de déchargement du silo. Pendant ces opérations qui durèrent en tout 10 jours, on utilisa un total de 18 000 m^3 de N_2.

Maïs (*Zea mais* L.)

Risque relatif d'entreposage : Modéré à faible

Normes de teneur en eau :

Sec	: jusqu'à 15,5 %
Gourd	: de 15,6 à 17,5 %
Humide	: de 17,6 à 21,0 %
Trempé	: de 21,1 à 25,0 %
Mouillé	: au-dessus de 25,0 %

Les limites maximales de teneur en eau pour les catégories U.S. n° 1, 2, 3, 4 et 5 de maïs jaune, blanc ou mélangé sont respectivement les suivantes : 14, 15,5, 17,5, 20,0 et 23,0 % (United States Department of Agriculture, 1978).

Directives de conservation : Les effets de la teneur en eau et de la température sur la durée de conservation limite du maïs sont décrits par Friesen et Huminicki (1986). Par exemple, du maïs entreposé avec une teneur en eau de 22 % se conservera à 27 °C pendant environ 5 jours; à 19 °C, pendant 10 jours; à 13 °C, pendant 20 jours; à 7 °C pendant 40 jours et à 4 °C pendant 60 jours. Le maximum de teneur en eau pour la conservation du maïs est de 13 % pour une durée de 1 an et de 11 % pour 5 ans. Dans du maïs décortiqué, une humidité relative intergranulaire de 70 % s'équilibre avec une teneur en eau de 14,0 %, à 25 °C (tableau 15) (Hall, 1980). En Ontario, à cause des basses températures de l'hiver, le maïs peut se conserver sans danger avec une teneur en eau de 15 % pendant tout l'hiver et le printemps, à condition d'être aéré convenablement. Pour une conservation s'étendant jusqu'à la fin de l'été, on doit obtenir une teneur en eau de 13 à 14 %, qui doit aller jusqu'à la zone de 11 à 13 %, si l'entreposage doit durer plusieurs années. Le maïs à forte teneur en eau destiné à l'alimentation du bétail est entreposé avec une teneur en eau comprise entre 22 et 32 % (Morris et coll., 1981).

Directives de séchage : La température maximale de séchage est de 45 °C pour le maïs destiné à la semence, de 60 °C pour le maïs à usage commercial et de 90 à 100 °C pour l'aliment du bétail (Friesen, 1981). Selon Morris et coll. (1981), la température critique maximale pour le séchage du maïs récolté à 28 % de teneur en eau en Ontario est de 45 °C pour la semence, 70 °C pour le maïs destiné à la fabrication d'amidon, 90 °C pour les autres usages industriels et l'alimentation des non-ruminants et enfin de 120 °C pour l'aliment du bétail. Le séchage est essentiel pour le maïs récolté à une teneur en eau supérieure à 18 %, à moins qu'on ne le place dans un silo étanche ou qu'on ne l'additionne d'acide propionique ou autres acides, ou qu'on ne le congèle (Campbell et coll., 1977). Les modifications qu'entraîne le séchage pour les protéines du maïs (durcissement) diminuent sa valeur pour le traitement humide, en rendant plus difficile la séparation de l'amidon et des protéines (Freeman, 1980).

Facteurs de déclassement : Le maïs est déclassé numériquement lorsqu'il contient des grains brûlés, chauffés ou pourris ou lorsqu'il présente une odeur de brûlé en cours d'entreposage, de fumée ou d'échauffement. Le grain est classé *Échantillon* s'il contient des grains brûlés et/ou une odeur de brûlé ou de fumée, plus de 3 % de grains chauffés ou une odeur d'échauffement, ou plus de 3 % de grains pourris.

Apparence des grains chauffés, pourris ou contaminés par la moisissure à oeil bleu : Les *grains chauffés* comprennent les grains

entiers ou fragmentés qui ont changé de couleur à la suite d'une fermentation naturelle, ou qui sont gravement roussis par le séchage articifiel, ou qui présentent une couleur allant de l'ambre au brun sombre sur toute la surface. Les germes sont de couleur brune et les grains très endommagés ont une apparence soufflée, spécialement dans la partie du germe. Les *grains pourris* sont des grains entiers ou fragmentés qui présentent l'aspect d'un stade avancé de décomposition et ont une consistance spongieuse à la pression. Les échantillons de grains sont déclassés en fonction des tolérances établies pour les grains endommagés par la chaleur et la pourriture. Les grains atteints par la moisissure à oeil bleu ont des germes de couleur foncée, et lorsqu'on les décortique, on peut noter le développement de moisissures. Le grain contenant plus de 15 % de grains touchés par la moisissure à oeil bleu sont classés *Échantillon*.

Problèmes d'entreposage : Le maïs a tendance à se fragmenter en cours de traitement et après séchage à température et vitesse trop élevées (Tuite et Foster, 1979; Hohenadel, 1984). Il en résulte une augmentation des grains brisés et des matières étrangères (BCFM), ce qui constitue un risque de détérioration en cours d'entreposage. Lorsqu'on charge du maïs dans un silo par le haut, le grain brisé et les matières étrangères se rassemblent au centre, dans l'axe du jet; cette région peut être le point de départ d'une détérioration, en partie parce que les matières fines qui sont essentiellement des fragments d'endospermes de maïs sont plus susceptibles que les grains entiers de subir l'invasion des champignons nuisibles, et également parce que les insectes et les acariens se développent particulièrement bien dans les matières fines et favorisent la croissance des champignons (Christensen et Sauer, 1982).

Le maïs est susceptible de se détériorer au cours de son transport en péniche fluviale ou en cargo de haute mer au départ des ports d'Amérique du Nord et d'Amérique du Sud (Christensen et Kaufmann, 1978; Milton et Jarrett, 1969). Des quantités importantes de maïs sont expédiées à partir des régions froides du Mid-West des États-Unis à destination des États du sud, plus chauds, soit pour la consommation locale comme aliments pour le bétail, soit pour l'exportation. Cette détérioration se produit à bord des navires en raison d'une combinaison de facteurs (Tuite et Foster, 1979). À son arrivée dans les ports du Golfe de la Nouvelle-Orléans ou dans d'autres ports, le maïs aura probablement déjà été infesté par des champignons d'entreposage, en particulier par l'*Aspergillus glaucus*. Il aura emprunté à l'air humide au moins 0,1 à 0,2 % de teneur en eau supplémentaire, et sa teneur en grains brisés et matières étrangères se sera considérablement accrue, en raison des nombreuses manutentions subies en route. De plus, le risque de détérioration se trouve augmenté par une expédition faite à un niveau de 15,5 à 16,0 % de teneur en eau, et par le manque d'aération efficace à bord du navire. Le maïs expédié dans les régions tropicales ou subtropicales est particulièrement vulnérable. La durée de conservation du maïs est rapidement diminuée en présence d'une augmentation des températures et des niveaux de brisures du grain (fig. 22) (Calverley et Hallam, 1982). Détérioration et échauffement se produisent également dans le maïs expédié d'Argentine en Europe; les facteurs qui entrent en jeu ont été étudiés de façon détaillée par Milton et Jarrett (1969).

L'agglomération du maïs à forte teneur en eau, qui est causée par l'activité des moisissures, peut entraîner le blocage des augets et des autres composantes des systèmes de manutention du grain. Les inégalités de pression ainsi produites peuvent entraîner un écroulement total ou partiel du silo ou du système de manutention.

Problèmes de séchage : Le séchage du maïs pose moins de problèmes que celui des grains de petite taille ou des graines oléagineuses, à cause de la plus faible résistance du grain, qui réduit les variations de température dans les chambres à air chaud. Par contre, le craquellement tensionnel et les rebonds d'humidité peuvent constituer des problèmes plus importants en raison de la forte proportion d'eau retirée. On peut atténuer ces difficultés en diminuant la vitesse de séchage une fois que le maïs a atteint 18 % de teneur en eau, soit au moyen d'un refroidissement moins rapide en appliquant une technique d'aération/séchage (Campbell et coll., 1977).

Étude de cas : 1. En mars 1981, 10 000 t de maïs jaune ont été expédiées d'Amérique du Nord au Mali, en passant par le canal du Saint-Laurent et par les ports de Dakar et d'Abidjan, à l'ouest de l'Afrique. À chaque port, 5 000 t environ avaient été déchargées, puis transportées à l'intérieur des terres par route et par rail. Sur la totalité de la cargaison initiale, 5 000 t seulement étaient propres à la consommation humaine au moment de l'arrivée à destination. Les modifications subies en cours de traversée ont été suivies en détail par Calverley et Hallam (1982). Au moment du chargement, selon le certificat d'exportation, le maïs avait 15,3 % de teneur en eau,

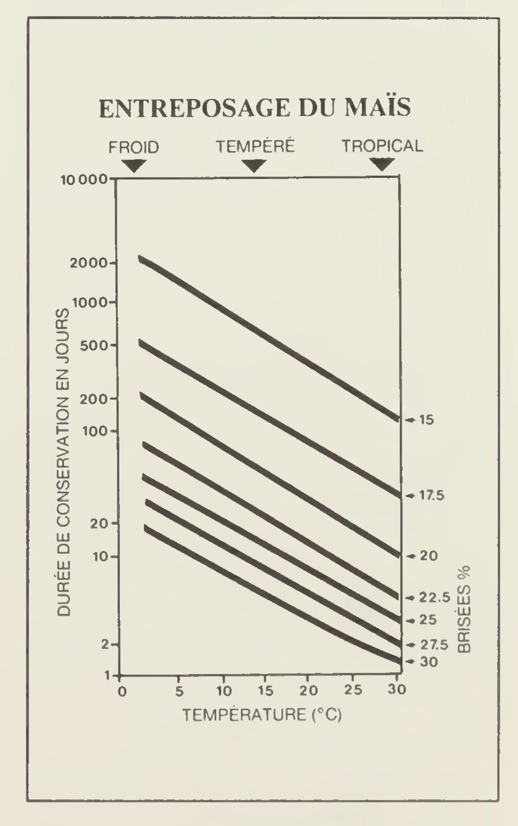


Figure 22 Durée de conservation du maïs dans divers milieux (d'après Calverley et Hallam, 1982).

4,6 % de grains brisés et matières fines (BCFM). À Dakar, le maïs qui se trouvait dans une humidité relative équilibrée de 70 %, à 22 °C (température moyenne du mois à Dakar), avait été expédié par rail au début juin et était arrivé à l'intérieur des terres sans problèmes. À Abidjan, le maïs, à un taux d'humidité relative de 77 %, à 28 °C, avait été considérablement détérioré et, bien que transporté en partie à l'intérieur des terres, était impropre à la consommation humaine. La détérioration avait été aggravée par des modifications de température, des brisures au chargement ainsi qu'au déchargement dans les ports, et par la manutention inappropriée en cours de transport à l'intérieur des terres. À Abidjan, la situation était encore aggravée du fait que la ventilation naturelle dans les sacs entassés avait été réduite par les hauts niveaux de grains brisés et de matières fines, ainsi que par une couche épaisse de poussière recouvrant les sacs.

2. En novembre 1982, une cargaison de 9 000 t de maïs à couronne blanche avait été expédiée de East London en Afrique du Sud à Liverpool au Royaume-Uni. En route, on découvrit un feu dans la cargaison et les orifices de ventilation de la cale ainsi atteinte furent obturés. À l'arrivée au Royaume-Uni, l'écoutille fut également obturée. On se servit temporairement d'un équipement d'extraction de gaz, on déchargea la cargaison intacte se trouvant dans les autres cales et, de façon discontinue, on injecta 17 t de dioxide de carbone (CO_2). Le CO_2 empêcha l'incendie, mais la température continua d'augmenter, indiquant que le feu s'étendait et augmentait d'intensité. On injecta un supplément de 1,5 t de CO_2 et la cargaison fut déchargée au moyen de bennes preneuses. Le feu devint alors visible et fut éteint au moyen d'une mousse à expansion moyenne 79,3 m^3 et de 140 t d'eau. La cause du feu fut attribuée à la présence d'une section non calorifugée du tuyau principal d'échappement du moteur, ayant provoqué la surchauffe du maïs dans la cale adjacente (Darby, 1973).

Christensen et Meronuck (1986) ont rapporté d'autres études de cas.

Farine de maïs

Risques relatifs d'entreposage : Élevés

Directives de conservation : La farine de maïs contient une quantité d'huile appréciable, qui a une forte tendance à s'échauffer. Elle doit être traitée avec soin, afin de maintenir une teneur en eau convenable; celle-ci doit être ramenée à la normale avant entreposage (National Fire Protection Association, 1949). La teneur en eau maximale conseillée pour la bonne conservation de la farine de maïs est de 11,5 % aux températures allant jusqu'à 27 °C (Muckle et Stirling, 1971).

Coton en balles (*Gossypium hirsutum* L.)

Risques relatifs d'entreposage : Élevés

Directives de conservation : Les myriades de petites fibres qui constituent les balles de coton et en recouvrent la surface les rendent particulièrement vulnérables aux sources d'inflammation ainsi qu'au développement d'une combustion rapide. Les feux qui se produisent dans les balles de coton ont leurs propres particularités et on doit en tenir compte si l'on veut éviter des pertes importantes. On cite des cas de feux dans du coton entreposé depuis des mois dans des parties inaccessibles d'entrepots, c'est ce qu'on appelle souvent du «coton froid». Il arrive aussi que le feu s'installe dans une balle de coton, à l'égreneuse, et que cette balle soit réceptionnée, pesée et entreposée sans que le feu soit détecté. Ce type de balle est connu sous le nom de «balle bourrée de feu à l'égreneuse». De telles balles, responsables d'incendies dans les magasins et dans les docks, se sont enflammées, alors qu'elles semblaient éteintes depuis plusieurs jours. On considère que le feu est éteint dans une balle cinq jours après qu'on a utilisé des techniques d'extinction appropriées. La meilleure défense contre de tels incendies, c'est un système de gicleurs bien entretenu, joint à un bon entretien des lieux, avec des couloirs larges et propres entre les balles entreposées en tas.

Voici les méthodes recommandées pour combattre les incendies:

Incendies dans les balles de coton entreposées dans les magasins;

- Fermer toutes les portes et supprimer tous les courants d'air de tirage dans le compartiment en question, que le magasin soit équipé ou non de gicleurs. Les courants d'air de tirage ne fournissent pas seulement de l'air frais au feu, mais ils propagent la chaleur en provenance du feu, déclenchant ainsi d'autres gicleurs à des endroits où leur action est inutile.
- Laisser aux gicleurs la possibilité de fonctionner et d'éteindre le feu en n'utilisant les lances d'incendies que si les gicleurs ne fonctionnent pas ou ne parviennent pas à éteindre le feu.
- Laisser le système de gicleurs remplir son office et évacuer les lieux si l'on ne parvient pas à éteindre le feu au moyen de l'équipement intérieur. En effet, un feu de balles de coton risque d'envahir la masse de matières entreposées avec une violence presque explosive.
- Une fois l'incendie éteint par les gicleurs, ouvrir la porte du compartiment, juste assez pour introduire la lance d'incendie ou pour retirer le coton. Les balles de coton en feu non déclaré doivent être retirées aussitôt que possible à l'extérieur, à un endroit où elles peuvent recevoir une attention particulière.
- Utiliser une lance à brouillard ou à eau pulvérisée, car une lance à jet d'eau risquerait de disperser les parties de coton en feu sur une grande surface et, ainsi, de propager l'incendie.

Incendies dans les balles de coton bourrées de feu à l'égreneuse :

- Il est important de comprendre la façon dont les feux se produisent. Au cours de l'égrenage, les fibres peuvent être enflammées par des

étincelles provoquées par le choc de pierres, de particules de métal ou d'autres matières contenues dans le coton en graines, contre les parties métalliques de la machine. Il arrive que le feu se déclare immédiatement, mais souvent, le coton en combustion lente se trouve incorporé à l'intérieur des balles. Généralement, ce feu chemine en direction de l'extérieur de la balle qu'il atteint en quelques heures ou en quelques jours. Et sa présence n'est souvent détectée que par l'apparition d'une fumée ou d'une odeur particulière.

- Toutes les balles suspectes doivent être placées dans un espace libre à une distance de 1 m des autres balles et maintenues sous surveillance constante pendant au moins 5 jours.
- Dès la détection du feu, mouiller les parties chaudes au moyen d'eau contenant un agent mouillant.
- Retirer à la main le coton brûlé, sans retirer les bandes de la balle car l'on risquerait ainsi d'enflammer d'autres fibres de coton.

Incendies dans les dépôts de coton :

- Commencer par projeter de l'eau de face et sous le vent du feu, puis travailler en sa direction.
- Rechercher la présence de feu sous les balles.
- Surveiller les jaillissements d'étincelles.
- Retirer les balles de coton voisines non atteintes, de façon à faire en coupe-feu.
- Retirer le coton brûlé afin de le regrouper dans une zone à part.

Ces conseils font partie d'un excellent compte rendu sur la lutte contre le feu dans le coton en balles par Baker (1963).

Graines de coton (*Gossypium hirsutum* L.)

Risques relatifs d'entreposage : Modérés

Normes de teneur en eau : Pour le U.S. Quality Index, la graine de coton de première qualité ne doit pas contenir plus de 12 % d'eau (Whitten, 1981). La teneur en eau maximale doit figurer sur une étiquette.

Directives de conservation : Dans la graine de coton, une humidité relative intergranulaire de 70 %, à laquelle on peut s'attendre à l'apparition de moisissures, s'équilibre avec une teneur en eau de 10,1 %, à 25 °C (tableau 15) (Hall, 1980). Pour une conservation de plusieurs mois, la graine de coton doit avoir une teneur en eau inférieure à 10,0 %, sans dépasser 10 à 15 °C. La détérioration des graines de coton peut commencer dans les champs, en particulier 10 à 15 jours après ouverture des capsules. Dans les conditions météorologiques optimales, à ce moment, la teneur en eau passe de 50 à 10 %, mais si l'humidité retarde la récolte, le niveau des acides gras libres augmente. Les graines de coton entreposées avec une teneur en acides gras libres supérieure à 2,5 % se détérioreront beaucoup plus rapidement que des graines avec 1 % d'acides gras libres. Cette détérioration augmente considérablement aux températures élevées (Gustafson, 1978).

Aux États-Unis, on entrepose les graines de cotton pendant 120 à 130 jours (Whitten, 1981), généralement dans des entrepots de métal équipés de systèmes de détection thermique et d'aération (Gustafson, 1978). Les graines de coton d'une qualité de conservation douteuse sont traitées rapidement après leur arrivée à l'usine. Les graines contenant plus de 12 % d'eau risquent de s'échauffer, à moins qu'on ne prenne les mesures nécessaires pour les refroidir. Sous surveillance étroite, il est possible d'entreposer des graines contenant de 10 à 11 % d'eau avec une teneur d'acides gras libres comprise entre 2,5 et 5,0 %. Les plus grandes précautions doivent être prises lorsqu'on entrepose des graines à forte teneur en acides gras libres et une teneur en eau supérieure à 10 %. De telles graines risquent de présenter des poches d'échauffement et leur température doit être surveillée tous les jours afin d'effectuer un refroidissement sélectif. Si elles ne sont pas soumises à une surveillance quotidienne, les graines risquent de se carboniser dans toute leur masse (Whitten, 1981).

Une forte teneur en eau a une action décisive sur la respiration des graines de coton et le développement des moisissures qui peuvent entraîner l'auto-échauffement et la carbonisation. L'échauffement peut atteindre des niveaux considérables allant jusqu'à 95 °C (Navarro et Paster, 1978).

Étude de cas : 1. En Israël, des graines de coton récoltées pendant la saison 1978 avaient été entreposées dans une cellule de type Muskogee contenant 500 t. L'auto-échauffement conduisit la température des graines de coton à la température de 270 °C. Des tests furent pratiqués sur des échantillons de graines de coton prélevées à différents endroits dans la masse. La teneur en eau des graines intactes était de 7,2 % tandis que celle des graines aux premiers stades de l'échauffement atteignait 13,6 % et que celle des graines se situant dans les endroits les plus chauds était de 2,8 %. Dans les points chauds, la perte de poids des graines endommagées était de 55,4 % par rapport aux graines intactes. La teneur en acides gras libres des graines arrivées à un stade avancé d'auto-échauffement atteignait 21,9 % tandis qu'on notait une augmentation du pourcentage de teneur en huile. Les observations indiquaient que l'échauffement spontané était provoqué par le déplacement de l'humidité à l'intérieur de la masse ainsi que la défectuosité du système d'aération dans la structure d'entreposage (Navarro et Friedlander, 1979).

2. Des cargaisons de granulés de graines de coton en provenance de l'Afrique occidentale étaient arrivées en Europe du nord-ouest avec une couche de 20 t de granulés agglomérés et moisis recouvrant leur surface, et causées par la condensation. Cette croûte épaisse de 30 cm à certains endroits dut être retirée et mise au rebut au prix d'une considérable dépense. Ce problème peut être

réduit à condition de charger les granulés dans des conteneurs ventilés, dans lesquels l'air est renouvelé cinq fois par heure (Clancy, 1979*a*). Des problèmes analogues se produisent avec des granulés de graines d'arachides.

Graines de sarrasin domestique ou blé noir (*Fagopyrum esculentum* Moench.)

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau :
- Sec : jusqu'à 16,0 %
- Gourd : de 16,1 à 18 %
- Humide : au-dessus de 18,0 %

Directives de conservation : On considère qu'une teneur en eau de 16 % donne une bonne conservation. Le blé noir est généralement récolté lorsque 75 % de ses grains ont pris une couleur brune. Cependant, du fait que le mûrissement est rarement uniforme, il y a généralement une certaine quantité de graines vertes au moment de la récolte. Mazza (1988) a étudié l'influence du régime d'entreposage et du cultivar sur la teneur en lipides, la composition des acides gras et la qualité sensorielle des graines de semence du sarrazin.

Directives de séchage : La température de séchage maximale est de 45 °C pour le blé noir, qu'il soit destiné à la semence ou aux utilisations commerciales (Friesen, 1981).

Facteurs de déclassement : Le blé noir est déclassé en catégorie *Échantillon* s'il contient des grains nettement chauffés ou brûlés et/ou s'il a une odeur nette d'échauffement ou de brûlé.

Graine de moutarde domestique

Jaune (*Sinapsis alba* L.)

Brune (*B. Juncea* (L.) Cosson.)

Oriental (*B. juncea* (L.) Cosson.)

Risques relatifs d'entreposage : Modérés

Normes de teneur en eau :
- Sec : jusqu'à 10,5 %
- Gourd : de 10,6 à 12,5 %
- Humide : au-dessus de 12,5 %

Directives de conservation : Les graines de moutarde exigent d'être conservées avec soin dans une cellule étanche. Il est vivement recommandé de les entreposer à des niveaux de teneur en eau inférieurs à 10 %, afin de réduire le risque de détérioration. On doit disposer à l'intérieur de la cellule un déflecteur destiné à détourner de la partie centrale de la cellule les matières immatures, plus lourdes et le plus susceptibles de s'échauffer (Campbell et coll., 1977).

Directives de séchage : La température de séchage maximale est de 45 °C pour les graines destinées à la semence ou aux utilisations commerciales (Friesen, 1981).

Facteurs de déclassement : La farine de moutarde est dégradée numériquement lorsqu'elle contient une proportion excessive de grains chauffés ou brûlés en cours d'entreposage, ou lorsqu'elle présente nettement une odeur d'échauffement; elle est classée dans la catégorie *Échantillon* lorsqu'elle contient plus de 1,0 % de graines chauffées ou lorsqu'elle présente une nette odeur d'échauffement.

Apparence des graines chauffées : Les graines sont écrasées en bandes de 100 (Conseil canadien du canola, 1974), afin de déterminer l'étendue de l'échauffement selon les trois catégories suivantes : *noir fusain* (gravement brûlé en cours d'entreposage), *brun chocolat foncé* (nettement échauffé) et *brun roux clair* (légèrement endommagé par l'oxydation). Les limites fixées pour les dommages provoqués par la chaleur correspondent aux couleurs noir fusain et brun chocolat foncé. Les échantillons contenant des graines brun roux clair font l'objet d'un examen olfactif attentif, portant à la fois sur la masse de l'échantillon et sur les bandes de graines fraîchement écrasées. Les graines de couleur brun roux clair sont considérées comme échauffées si elles présentent une odeur ou si elles sont associées à des graines écrasées de couleur noire ou brune. En l'absence de ces signes associés, les graines de couleur brun roux clair sont classées comme endommagées.

Féveroles (*Vicia faba* L. var. *minor*)

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau :
- Sec : jusqu'à 16,0 %
- Gourd : de 16,1 à 18,0 %
- Humide : au-dessus de 18,0 %

Directives de conservation : La teneur en eau maximale recommandée pour l'entreposage des féveroles est de 16 % au Canada (Evans et Rogalsky, 1974) et de 15 % au Royaume-Uni (United Kingdom Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1970). Des féveroles contenant 14,2 % d'eau et n'ayant pas été endommagées par le gel ont été conservées en bon état pendant 2 ans au Manitoba (Wallace et coll., 1979). Par contre, les féveroles de basse qualité endommagées par le gel et d'une teneur en eau supérieure à 15 % présentaient un échauffement au cours de l'été suivant la saison d'hiver.

Directives de séchage : Il est recommandé d'effectuer le séchage à 32 °C, au maximum. Le séchage doit être effectué en deux phases si l'on doit retirer plus de 5 % d'eau pour obtenir une teneur de 16 % pour l'entreposage. Entre chaque phase de séchage, on doit ménager un intervalle de quelques jours, afin de permettre à l'humidité interne de se déplacer vers la surface. On ne doit pas faire sécher les féveroles rapidement à haute température en raison du risque de fendillement des graines et de la réduction de leur viabilité (Campbell et coll., 1977). Les féveroles peuvent également être trop séchées à leur surface et pas assez séchées à l'intérieur. Des féveroles insuffisamment séchées donnent

une farine pâteuse qui, en cours d'entreposage prolongé, devient rance et échauffée. Aux températures de séchage dépassant 40 °C, la peau des féveroles se plisse et se fend, particulièrement lorsqu'elles contiennent beaucoup d'eau. Il faut éviter le fendillement du test, sinon les micro-organismes peuvent pénétrer et entraîner la pourriture (Nash, 1978).

Facteurs de déclassement : Les graines de féveroles sont déclassées numériquement lorsqu'elles contiennent une forte proportion de graines chauffées ou pourries et lorsqu'elles présentent nettement une odeur d'échauffement ou de moisi. Les graines entières ou en fragments sont toutes deux considérées dans le classement. Les graines de fèves sont classées dans la catégorie *Échantillon* si elles contiennent plus de 1 % de graines chauffées ou pourries ou bien si elles présentent nettement une odeur d'échauffement ou de moisi.

Apparence des féveroles chauffées et pourries : Les graines de féverole chauffées ou pourries sont celles qui ont subi un changement de couleur important provenant de l'échauffement ou de la pourriture. L'enveloppe des graines se présente alors sous une couleur allant de brun à noir, et le tissu des cotylédons, lorsqu'on sectionne les graines, apparaît de couleur brun roux ou brune.

Problèmes d'entreposage : Normalement, on récolte les féveroles lorsque les cosses sont noires et que les tiges sont fanées. Du fait que l'eau s'élimine lentement des cosses épaisses et charnues, ainsi que des graines larges, une période prolongée est nécessaire pour le mûrissement et le séchage avant récolte, en particulier dans les climats froids. Si la récolte est moissonnée trop tôt, les féveroles contenues dans les cosses du haut ne seront pas mûres et contiendront plus d'eau que celles des cosses inférieures. En raison de leur mûrissement prolongé, de leur récolte tardive, des dommages entraînés par le gel (Wallace et coll., 1979) et des problèmes entraînés par le séchage lent, les graines de féverole sont fréquemment entreposées dans un état non uniforme, ce qui explique la nécessité de les surveiller avec soin en cours d'entreposage.

Étude de cas : En octobre 1979, un fermier de l'ouest du Manitoba remarqua une vapeur s'échappant du sommet d'une de ses cellules d'entreposage de 270 t contenant des graines de féverole de l'année 1978. Le silo était muni d'un plancher perforé et d'une unité d'aération détachable. Les féveroles avaient été initialement entreposées à une teneur moyenne de 15,5 % d'eau au cours du mois de novembre précédent, par temps froid. Un échauffement fut observé pour la première fois dans la cellule le 28 septembre 1979. Après avoir noté la vapeur qui s'échappait, le fermier mit en route l'unité d'aération afin d'aspirer l'air froid de la nuit à travers les féveroles, en vue de réduire leur température. Au cours de la nuit, des flammes apparurent, provenant de la gaine reliant l'unité d'aération à la cellule. Le ventilateur fut alors fermé; 5 jours après le feu, les féveroles situées à l'intérieur de la cellule étaient partiellement cuites. La vapeur s'échappait par l'ouverture du panneau du toit et un liquide brun s'écoulait par les trous des rivets à la jonction entre le toit et la paroi de la cellule. Deux jours après, il y avait une marre de 90 L de ce liquide sur le sol (fig. 20*a*). La température de l'air au-dessous du plancher perforé (fig. 20*b*), mesurée par sonde à thermocouple était de 260 °C, à une distance de 180 cm de la paroi de la cellule. La température à l'intérieur de la masse des féveroles située au-dessus devait être encore plus élevée, mais on ne put la déterminer en raison des difficultés d'accès. Par contre, la surface extérieure de la paroi de la cellule était froide au toucher. Des bruits alarmants de bouillonnement et de sifflement se faisaient entendre à l'intérieur de la cellule, et à une distance de plusieurs centaines de mètres de la cellule, on pouvait sentir une odeur organique de brûlé. Aucune récupération n'était possible, si bien que le contenu de la cellule fut laissé dans un état de combustion lente, finissant par être totalement transformé en cendres (fig. 20*c*) (Mills, 1980).

L'échauffement des graines de féverole s'est effectué en deux phases : un échauffement biologique lent associé à une détérioration, suivi d'un échauffement chimique rapide, accéléré par l'aération.

Méthode de traitement utilisée :

- Des échantillons ont été prélevés des camions au moyen d'une sonde, pour la détermination de la teneur en eau.
- L'hygromètre Halross 919 a été essayé par comparaison avec un engin du même genre dans un élévateur local et a donné des chiffres supérieurs de 0,04.
- Les féveroles ont été retournées trois ou quatre fois pendant l'hiver 1978–1979, mais pas par la suite.
- Les féveroles n'avaient été aérées que la nuit de l'incendie, le 4 octobre 1979.
- Le feu s'était éteint après l'arrêt des ventilateurs.
- Le contenu de la cellule avait continué de se consumer lentement.

Bonnes méthodes :

- On aurait dû nettoyer, aérer ou sécher les féveroles de façon à les amener à un niveau de teneur en eau inférieur de plusieurs points au chiffre de 16,0 %, de façon à ménager une marge de sécurité en vue des augmentations d'humidité par déplacement au cours des mois d'hiver.
- On aurait dû surveiller avec soin la teneur en eau et la température des matières ensilées à intervalles et à des dates enregistrées en vue des références futures.
- On aurait dû déterminer la teneur en eau de plusieurs échantillons de chaque chargement, afin d'obtenir des renseignements sur la teneur en eau maximale et les risques éventuels.

Tableau 17 Évaluation du nombre de semaines de conservation des haricots bruns avant l'apparition d'une diminution de la germination (d'après Kreyger, 1972)

Teneur en eau (% de base humide)	11	12	13	14	16	18	20,5	23
Température d'entreposage (°C)	Nombre maximum de semaines de conservation en entreposage							
25	31	22	16	11	7	4	2	0,5
20	55	40	28	19	13	7	3,5	1,5
15	100	75	50	30	20	12	6	3
10	200	140	95	60	38	20	11	4,5
5	370	270	170	110	70	39	20	9

- Dans un silo aussi important, on aurait dû installer des thermocouples destinés à indiquer toute élévation anormale de température provoquée par des moisissures et des bactéries.
- On aurait dû aérer ou retourner les stocks à intervalles réguliers, pour égaliser les gradients d'humidité et de température et pour réduire les risques d'échauffement biologique.
- On aurait dû aérer les matières connues pour être à un stade avancé d'échauffement.
- Le fermier aurait dû se renseigner auprès d'un professionnel sur la façon de traiter le problème d'échauffement qui avait été détecté sept jours avant l'incendie.

Haricots (*Phaseolus vulgaris* L.)

Parmi les haricots, on compte des haricots blancs (les plus importants), les haricots rouges clair et foncé, les haricots noirs, les haricots pies, les haricots roses, les haricots rouges petits, les haricots du Grand Nord, les haricots à hile jaune et les haricots canneberges.

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau :
Sec : néant

Gourd : néant

Humide : au-dessus de 18,0 %

Directives de conservation : La teneur en eau recommandée pour la conservation des haricots est de 18,0 % (Campbell et coll., 1977). Cependant, pour un entreposage à long terme, ce chiffre de 18,0 % est trop élevé, même à 5 °C, pour les haricots destinés à la semence (tableau 17) (Kreyger, 1972). La teneur en eau maximale pour la conservation des haricots jusqu'à un an est de 17,0 % (Hall, 1980). Les haricots doivent être récoltés lorsque la plupart des cosses sont sèches et que les grains de haricots se sont durcis, mais avant que ces grains commencent à se briser. La teneur en eau optimale pour la récolte des haricots est comprise entre 16,0 et 18,0 %. À des niveaux de teneur en eau inférieurs à ces derniers, on risque d'enregistrer des dommages importants, car les grains du haricot brisés ou fendillés ne peuvent être utilisés que pour l'alimentation du bétail (Campbell et coll., 1977).

Directives de séchage : Le séchage est nécessaire lorsque les haricots sont récoltés à l'état humide en raison du mauvais temps ou lorsque les pertes à la récolte, causées par les brisures, sont excessives. Les températures de séchage maximales pour les haricots sont comprises entre 27 et 32 °C. Les haricots doivent être séchés lentement et, si nécessaire, on doit retirer l'excès d'humidité en deux phases (voir féveroles). On doit prendre les plus grandes précautions en cours de séchage car le fendillement se développe même aux températures relativement faibles, et les fêlures qui constituent un facteur de déclassement augmentent avec la température. En cours de séchage, l'humidité relative de l'air chauffé doit être maintenue au-dessus de 40 % (Campbell et coll., 1977; R. Stow, communication personnelle, 1986).

Facteurs de déclassement : Les haricots sont déclassés numériquement lorsqu'ils contiennent des quantités importantes de grains chauffés ou moisis (fig. 17*a*), ou lorsqu'ils présentent une odeur d'échauffement ou nettement moisie. Les haricots sont classés dans la catégorie *Échantillon* s'ils contiennent plus de 1 % de grains chauffés ou s'ils présentent une odeur d'échauffement ou nettement moisie, ou plus de 1 % de grains moisis. Les grains moisis se caractérisent par la présence à l'extérieur de moisissures bleu foncé qui se développent dans les fentes causées par la machine, tandis que les moisissures intérieures de couleur allant de jaune à noir, se développent dans la zone concave du centre et sont répandues particulièrement chez les haricots rouge clair et foncé.

Apparence des grains chauffés : Les haricots chauffés ont un revêtement d'une couleur variant de crème à acajou. La couleur est plus intense

dans la région du hile. En coupe transversale, la couleur des cotylédons varie du brun roux au brun foncé. Les cotylédons de couleur très claire sont classés comme endommagés et non comme échauffés. Les haricots rouge clair et foncé ont un revêtement de couleur allant du rouge foncé au noir. Enfin les haricots doivent être fendus pour déterminer le degré d'intensité des dommages causés par la chaleur.

Problèmes d'entreposage : Les dommages qu'entraînent la manutention mécanique représentent un problème dont l'importance augmente aux températures basses et aux faibles niveaux de teneur en eau. Pour réduire ces dommages, dans la mesure du possible, on doit utiliser des transporteurs à courroie ou des chargeuses frontales et non pas des augets; il faut également éviter de laisser tomber les haricots d'une trop grande hauteur, en particulier lorsqu'ils atterrissent sur des planchers en béton (Campbell et coll., 1977).

Farine de poisson

Risques relatifs d'entreposage : Ces risques sont élevés pour les cargaisons provenant du Chili, du Pérou et d'Afrique du Sud, mais moins élevés avec celles de l'hémisphère nord.

Normes de teneur en eau : La norme de teneur en eau est entre 6 et 12 % en Afrique du Sud (anonyme, 1983*a*). Au Canada, il n'y a pas de limites légales, mais le manufacturier est tenu par la *Loi sur les aliments du bétail* de préciser la teneur en eau maximale présente dans son produit.

Directives de conservation : De 15,5 à 21 °C, les niveaux de teneur en eau recommandés pour la conservation de la farine de poisson, selon Snow et coll. (1944), sont de 11,5 % (équivalant à 72 % d'humidité relative) pour 3 mois de conservation et de 9,9 % (65 % d'humidité relative) pour une période de 2 à 3 ans. En 1983, l'Afrique du Sud publiait une série de directives relatives au transport de la farine de poisson dans les cales de navires. La teneur en graisse ne doit pas excéder 11 %, le produit doit être entreposé pendant au moins 21 jours avant le chargement et, au moment du chargement, la teneur en eau doit être comprise entre 6 et 12 %. Pour finir, on doit prévoir suffisamment d'espace entre les rangées de sacs placés dans la cale pour permettre la dispersion de la chaleur qui se produit en cours d'entreposage. Récemment, on a réussi à transporter de la farine de poisson sans problèmes, en vrac dans des cales de navire, sous une couche de gaz inerte et sous forme de granulés traités au moyen d'un antioxydant. Mais ces deux méthodes ne sont pas sans inconvénients, si bien qu'au niveau international, la farine de poisson est toujours transportée en sacs (anonyme, 1983*a*).

Problèmes d'entreposage : La farine de poisson transportée en sacs a tendance à s'échauffer lorsqu'elle est soumise à la pression de l'entassement dans les cales de navire. L'échauffement endommage les sacs, réduit la teneur en protéines et entraîne des risques d'auto-inflammation, risquant d'endommager le navire lui-même. Au début des années 1960, un certain nombre d'incidents se sont produits dans des cargaisons de farine de poisson, d'origine péruvienne et chilienne, avec des phénomènes d'auto-inflammation. La forte teneur en graisses des anchois contenus dans la farine avait donné à ce produit une forte tendance à l'auto-inflammation. L'introduction de nouvelles directives a réduit l'incidence des cas au cours des dernières années.

Étude de cas : En décembre 1982, des feux persistants se produisirent dans une cargaison de farine de poisson d'origine chilienne entreposée à fond de cale du M.V. *Luise Bornhofen*. Ce navire, en route pour la Chine, mit le cap sur Honolulu, où pendant 6 semaines, on déchargea la cargaison endommagée et échauffée. Sur trois autres navires en route vers la Chine et le Japon en janvier 1983, il se produisit également des phénomènes d'auto-échauffement dans les cargaisons de farine de poisson d'origine chilienne. Les analyses pratiquées sur la farine de poisson en sacs à bord du M.V. *Luise Bornhofen* montrèrent que la teneur en graisses était inférieure au maximum accepté pour le transport en sacs. À l'heure actuelle, on ne sait toujours pas si cette série d'incidents résulte d'un relâchement dans les normes d'arrimage ou s'il s'agit d'un jeu de circonstances entièrement nouvelles et inconnues (anonyme, 1983*a*).

Graines de lin (*Linum usitatissimum* L.)

Risques relatifs d'entreposage : Modérés

Normes de teneur en eau :

Sec	: jusqu'à 10,0 % (à partir du 1er août 1988)
Gourd	: de 10,6 % à 13,5 %
Humide	: au-dessus de 13,5 %

Directives de conservation : La teneur maximale en eau recommandée pour la conservation de la graine de lin est de 10 %. Cependant, pour une conservation à long terme, la graine de lin destinée à la semence contenant 10,5 % d'eau demande un refroidissement à 10 °C ou moins (Kreyger, 1972). Pour une conservation dépassant 6 mois à des niveaux de température dépassant 20 à 25 °C, la teneur maximale en eau ne doit pas dépasser 10,0 % dans toute la masse du chargement (Christensen et Kaufmann, 1969). Le lin récolté doit être entreposé à l'état sec, car la graine de lin est recouverte d'une substance mucilagineuse qui, une fois mouillée, peut devenir extrêmement gluante. Si la graine de lin est entreposée dans un état gourd ou humide, ou si elle est exposée à la pluie ou à la neige, il peut se produire une agglomération des graines qui les rend impropres à la vente (Daun, 1982). La graine de lin respire de façon beaucoup plus vigoureuse que les céréales lorsqu'elle se trouve entre 11 et 17 % de teneur en eau (Bailey, 1940) et lorsqu'elle se trouve entreposée à l'état humide, elle s'échauffe très rapidement, en quelques jours. Par exemple, à 14 % de teneur en eau et à 25 °C, on note une production importante de dioxyde de carbone après 8 jours et les moisissures apparaissent après 10 jours (Larmour et coll., 1944).

Directives de séchage : Les températures maximales de séchage sont de 45 °C pour la graine de lin destinée à la semence, de 80 °C pour l'utilisation commerciale et entre 80 et 100 °C pour l'alimentation du bétail (Friesen, 1981).

Facteurs de déclassement : La graine de lin est déclassée si elle contient des graines brûlées par le feu ou chauffées, ou si elle présente une odeur de brûlé ou d'échauffement; les graines sont classées dans la catégorie *Échantillon* si elles contiennent plus de 10 % de graines chauffées ou si elles présentent une odeur de chaud ou de brûlé.

Apparence des grains chauffés : Les grains chauffés sont généralement d'apparence brillante, brune ou noire. En coupe, la couleur de la pulpe est brun roux, orange ou brun foncé selon le degré d'endommagement. Les grains très chauffés sont souvent accompagnés d'une odeur d'échauffement.

Problèmes d'entreposage : Les graines de lin, lorsqu'elles sont récoltées à l'état humide peuvent produire dans le silo un produit mortel : le cyanure d'hydrogène (acide prussique ou acide cyanhydrique). Ce produit est un poison à action extrêmement rapide qui peut s'absorber à travers la peau (Bond, 1984). Avant d'entrer dans des silos contenant du lin entreposé avec une forte teneur en eau ou comportant une forte proportion de graines germées ou endommagées, on doit d'abord s'assurer que la cellule est parfaitement ventilée et qu'on peut disposer de l'aide d'autres personnes. En 1977, au Minnesota, un travailleur d'élévateur sautant dans une cellule pleine de graines de lin, mourut d'un empoisonnement au cyanure d'hydrogène, produit par les graines qui avaient germé dans les champs avant d'être battues et entreposées avec une forte teneur en eau (Western Producer, 1977). En 1941, toujours dans le Minnesota, des niveaux allant jusqu'à 0,03 % de monoxyde de carbone (300 ppm) furent trouvés dans l'air intergranulaire de graines de lin de catégorie *Échantillon* dans un entrepôt commercial (Ramstad et Geddes, 1942). Dans Christensen et Kaufmann (1969), on trouvera un compte rendu intéressant des problèmes de détérioration qui se sont produits dans de la graine de lin entreposée au Minnesota et dans le Dakota du Nord.

Étude de cas : Dans la région de Winnipeg (Man.), en octobre 1985, une cellule de stockage en métal sur montants de bois et à plancher de bois, d'une contenance de 127 t fut remplie de lin. On chargea des graines venant du même champ dans une cellule métallique voisine aérée, d'une contenance de 254 t et construite sur une base de béton. La cellule non aérée avait 6 m jusqu'à l'avant-toit et était renforcée par des équerres verticales. Au moment de l'entreposage, les graines se trouvant dans la couche supérieure de 1,8 m de la cellule, étaient à 11,3 % de teneur en eau. Cinq mois après, en mars 1986, on retira des graines au moyen d'un auget par l'orifice inférieur de la cellule non aérée. Après qu'on eut retiré 5 t de graines, l'auget se bloqua et la partie inférieure de la cellule adjacente à l'orifice s'effondra (fig. 21*a* et 21*b*). Après avoir retiré la graine de lin de la couche supérieure (1,8 m) de la cellule, on découvrit une couche solide, chaude au toucher, et répandant une vapeur visible. On pouvait noter la présence d'une grande quantité de particules fines et de débris de cosses adhérent aux parois de la cellule. Sous la croûte se trouvait un volume important de graines fondues ensemble, de couleur noir charbon et de grains moisies agglomérées. Le producteur réussit à récupérer 24 % des graines entreposées, en bon état. Du reste, 40 % étaient chauffées à moins de 25 %, 6 % étaient chauffées à 50 % et 30 % étaient totalement inutilisables et durent être rejetées (fig. 21*c*). Par contre, tout le lin qui avait été aéré fut retrouvé en bon état (Wilkins, 1986). Le problème structural était, dans ce cas, une déformation de la paroi causée par un déchargement excentré (Jenike, 1967) et non un problème de plancher (G. Henry, communication personnelle, 1986).

Méthodes de traitement utilisées :

- Les échantillons destinés à la détermination de la teneur en eau à l'élévateur ont été prélevés, mais seulement à partir de la couche supérieure, sur 1,8 m d'épaisseur.
- Les échantillons prélevés à des emplacements similaires en cours d'hiver ne permirent pas de déceler d'odeur suspecte ni d'échauffement.
- Après l'effondrement de la cellule, la paroi située près de l'orifice inférieur fut soutenue au moyen du godet d'une chargeuse frontale.
- On découpa un trou dans la paroi du haut de la cellule afin de permettre l'enlèvement des graines de lin en bon état au sommet de la cellule.
- Le producteur pelleta de lin vers l'orifice.
- Au début, aucune ventilation ne fut installée; plus tard, on retira des tôles du toit et on installa un ventilateur de 50 cm au sommet afin de provoquer une contre-ventilation.
- Les matières en croûtes ont été brisées au moyen d'un rotoculteur et la cellule fut ouverte en deux et soulevée de façon à permettre l'enlèvement des matières fusionnées.

Erreurs commises :

- La détermination de la teneur en eau aurait dû être effectuée sur des échantillons représentatifs prélevés en cours de chargement de la cellule.
- Un surveillance inappropriée de la cellule ne touchant que les 30 % supérieurs du contenu.
- On est entré dans une cellule présentant un espace vide inférieur connu, sans être accompagné, sans corde de sécurité et sans ventilation appropriée.

- Le producteur a réagi immédiatement sans demander au préalable l'avis d'un professionnel.

Méthodes recommandées :

- On aurait dû construire la cellule en prévoyant une aération.
- On aurait dû utiliser un disperseur pour disséminer les débris de plantes et les particules fines, mais les disperseurs sont de faible capacité, tendent à densifier le grain et par conséquent peuvent présenter des inconvénients quand on aère.
- On aurait dû installer verticalement des thermocouples, au centre de la cellule.
- On aurait dû décharger plusieurs lots dans des camions, pour les remettre au sommet du chargement de la cellule; les matières retirées auraient dû être examinées afin de rechercher l'échauffement.
- On aurait dû prélever des échantillons en profondeur à la partie inférieure de la cellule.
- On aurait dû pénétrer dans la cellule muni d'un équipement de protection et sous couvert d'une forte ventilation. La personne en question aurait dû porter un harnais de sécurité.
- Il devrait y avoir au moins une personne présente prête à intervenir.

Foin

Risques relatifs d'entreposage : Élevés

Directives de conservation : Pour la conservation du foin, le niveau maximum de teneur en eau est de 20 à 25 % pour 1 an de conservation et de 15 à 20 % pour 5 ans (Hall, 1980). Du foin humide ou mal refroidi risque fort de s'échauffer par temps chaud. Il est rare que le foin en balle s'échauffe dangereusement. Pour une bonne conservation, le foin doit être maintenu sec et froid (National Fire Protection Association, 1949). Les changements de qualité qui se produisent dans le foin en cours d'entreposage (échauffement et brunissement non enzymatique)

Tableau 18 Étapes de l'échauffement en cours d'entreposage de foin humide ou de fourrage sec

Température (°C)	Processus	Modification des substances nutritives
Ambiante–40	Processus de sudation normale, respiration cellulaire possible, activité microbienne limitée. Possibilité d'une certaine fermentation.	Élimination de l'humidité excessive. Très faible perte causée par la respiration.
40–50	Sudation normale, activité microbienne, cessation des processus végétaux à 45 °C. Possibilité d'une certaine fermentation.	L'humidité en excès continue à s'éliminer. Perte très réduite.
50–60	Activité thermophile des micro-organismes. Le brunissement non enzymatique commence.	Diminution de digestibilité et baisse des protéines disponibles.
60–70	Activité thermophile des micro-organismes, augmentation des réactions d'oxydation. Le brunissement non enzymatique continue.	Nouvelle diminution de la digestibilité et baisse de protéines.
70–80	Cessation de l'activité biologique. Réactions d'oxydation purement chimiques. À 80 °C, la température risque de s'élever très rapidement. Brunissement non enzymatique très prononcé, caramélisation des sucres.	Très forte diminution de la digestibilité et baisse de protéines.
80–280	Des réactions d'oxydation se produisent rapidement, en raison des températures élevées.	Carbonisation du fourrage, fortes pertes de matières sèches.
280–300	Les réactions d'oxydation continuent.	Risque d'inflammation en cas de présence importante d'oxygène.

Source: Moser, L.E., 1980. Crop quality, storage, and utilization. Reproduit avec la permission de l'American Society of Agronomy et la Crop Science Society of America.

sont résumés par Moser (1980). Le foin humide et le fourrage ensilé sec (de 30 à 50 % de teneur en eau) risquent de s'échauffer et d'entraîner des pertes considérables de valeur nutritive. Dans les situations normales, une température élevée allant jusqu'à environ 50 °C ne doit pas être considérée comme alarmante, car une augmentation de température se produit normalement au cours du processus de sudation. Si la température atteint 60 °C, la perte de valeur nutritive est préoccupante. Plus haute est la température et plus importantes sont les pertes par oxydation, car les éléments nutritifs les plus facilement digérés sont oxydés les premiers. Le tableau 18 décrit le processus d'échauffement dans le foin humide et dans le fourrage ensilé sec (Moser, 1980).

Lentilles (*Lens esculenta* Moench.)

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau :
- Sec : jusqu'à 14,0 %
- Gourd : de 14,1 à 16,0 %
- Humide : au-dessus de 16,0 %

Directives de conservation : Une fois andainées, les lentilles demandent de 7 à 10 jours pour sécher, selon le temps, mais elles ne doivent pas rester en andain pendant de longues périodes, car elles changent de couleur. La teneur en eau acceptable pour les lentilles entreposées est de 13,5 % ou moins. On s'efforce actuellement d'élever la limite supérieure des graines sèches au niveau de 16 % de teneur en eau, analogue à celui des autres légumes secs.

Directives de séchage : Le séchage à l'air naturel des lentilles a plusieurs avantages sur le séchage à l'air chaud : élimination des

Tableau 19 Un aperçu des exportations de granulés, farines et tourteaux du Canada en 1985 (Statistique Canada, 1985)

	Principaux importateurs par ordre d'importance									
Denrées	Japon	É.-U.	Corée du sud	Irlande	Taiwan	Indo-nésie	Nor-vège	R.-U.	Prix à la tonne ($)	Vente totale $ (tous pays)
Luzerne déshydratée	1(5)	3(2)			2(2)				147,0	43 197 000
Colza, tourteaux et farines	3(3)	1(4)	4(3)		6(3)	2(3)	5(3)		128,7	39 620 000
Aliments du bétail et des bovins	2(3)	1(4)							217,4	24 204 000
Son de blé, remoulures et semoules	2(3)	1(4)	3(2)						118,1	16 044 000
Granulés de criblures	1(4)	2(2)	3(2)	4(2)					77,0	13 567 000
Grains de brasserie et de distillerie et autres solubles		1(3)							116,1	11 447 000
Farine de poisson		2(2)			1(2)			3(1)	220,0	4 463 000
TOTAL										152 542 000

(1) très petit (moins de 5 000 t)
(2) petit (5 000 à 25 000 t)
(3) modéré (25 000 à 100 000 t)
(4) important (100 000 à 200 000 t)
(5) très important (plus de 200 000 t)

fendillements tensionnels, réduction de la manutention en auget entraînant moins de fendillements et de fragmentations, ainsi que moins de surveillance. Il est essentiel de prévoir une conception appropriée du système de séchage à l'air naturel, car l'emploi d'un débit d'air inapproprié risque d'entraîner détérioration et échauffement (Agriculture Manitoba, 1986). Dans des séchoirs à air chaud, la température maximale de séchage recommandée est comprise entre 38 et 40 °C pour les graines destinées à la semence ou à l'alimentation, ce qui correspond à une température maximale de la chambre comprise entre 60 et 65 °C. Des températures plus élevées risquent de gêner la germination et de donner une odeur et un goût de grillé (F. Beaudette, communication personnelle, 1986).

Facteurs de déclassement : Les lentilles sont déclassées numériquement lorsqu'elles contiennent une forte quantité de graines chauffées, ou lorsqu'elles présentent une odeur d'échauffement ou de moisi, et elles sont classées dans la catégorie *Échantillon* si elles contiennent plus de 1 % de graines chauffées ou présentent une odeur d'échauffement ou nettement moisie. Les échantillons contenant des graines nettement chauffées, avec une chair de couleur brun à brun foncé sont déclassés selon les tolérances établies. Les échantillons contenant des graines légèrement endommagées ayant une chair de couleur brun roux sont classés comme chauffés s'ils présentent une odeur nette, sinon ils sont classés comme endommagés.

Problèmes d'entreposage : Les lentilles entreposées ont une cuticule fine qui pèle lorsqu'elles sont manutentionnées au printemps, ce qui entraîne une baisse de qualité; c'est pourquoi on les déplace généralement vers Noël.

Farines, granulés et tourteaux

Risques relatifs d'entreposage : de très élevés à faibles, selon le produit

Normes de teneur en eau : Au Canada, les manufacturiers sont tenus par la loi de préciser sur les sacs la teneur maximale en eau pour les farines à un seul composant comme la farine de soja. Pour les aliments et les granulés mélangés, on n'est pas obligé de préciser la teneur en eau. En Allemagne, les lois sur les aliments du bétail prescrivent une teneur en eau de 14,0 % pour les granulés (Löwe et Friedrich, 1982).

Directives de conservation : La teneur en eau recommandée pour la conservation des aliments industriels est généralement considérée comme celle qui est en équilibre avec un maximum d'humidité relative de 70 %, niveau auquel les moisissures commencent à se développer. Les teneurs en eau recommandées pour un certain nombre d'aliments du bétail figurent en caractère gras dans le tableau 15, en supposant une période de conservation allant jusqu'à 1 an, en l'absence d'acariens. En cas de problèmes d'acariens, la teneur en eau recommandée sera celle qui est en équilibre avec 60 à 65 % d'humidité relative, niveau auquel les populations d'acariens tendent à s'éteindre ou à demeurer numériquement statiques (Henderson, 1985). Dans le tableau 19, figurent les principales exportations de granulés, farines et tourteaux du Canada en 1985 (Statistique Canada, 1985). Par ordre d'importance : luzerne déshydratée, tourteaux et farines d'huile de colza; aliments pour bovins et pour bétail; son de blé, remoulage et semoule; criblures granulées, grains de brasserie et de distillerie, et farine de poisson. Le comportement de ces produits en cours d'entreposage est décrit dans notre texte sous des rubriques séparées.

Problèmes d'entreposage : Les migrations d'humidité et de chaleur, causées par des différences extrêmes de température, se produisent à l'intérieur des diverses substances granulées, en particulier quand les silos ne sont pas isolés. Les différences de température peuvent se produire entre le jour et la nuit, ou par l'action du soleil sur une paroi tandis que le côté à l'ombre reste froid. Ces différences de température se produisent également lorsque des granulés fabriqués récemment sont entreposés ou embarqués dans les conditions de froid qui règnent dans les Prairies. Les déplacements d'humidité conduisent à la formation de poches d'accumulation d'humidité, au développement de moisissures et, pour finir, à des problèmes de détérioration. Löwe et Friedrich (1983), en Allemagne de l'Ouest, ont fait une étude de simulation de l'action du soleil sur le côté d'un vaste silo plein de granulés pour l'alimentation des porcs. De l'eau de condensation s'accumula à la surface et sur les parois extérieures, et la détérioration commença après 1 semaine. Des moisissures provoquèrent une agglomération des granulés qui se rassemblèrent en blocs, empêchant leur écoulement et le transport ultérieur. Avant même l'apparition de toute moisissure visible, les caractéristiques d'écoulement commencèrent à s'abaisser, car les granulés absorbaient l'humidité, se gonflaient et se ramollissaient. La diminution de faculté d'écoulement des granulés est une indication de modifications d'humidité, pouvant entraîner le développement de moisissures et de mycotoxines.

À long terme, des problèmes d'adhérences, de «trous de rats» et de formation de ponts apparaissent souvent dans les silos contenant des farines, des criblures, des granulés et autres matières finement divisées. Parmi les exemples d'adhérences récemment retirées des silos aux États-Unis et au Canada, on peut citer les criblures de maïs, les granulés de gluten de maïs, les semoules de blé, le son, le millet moulu, la farine de soja, les enveloppes de haricots fendillées, la balle d'avoine et de multiples criblures (B. Cartright, comm. pers., 1986).

Les problèmes d'échauffement dans les farines et granulés entreposés proviennent de la présence accidentelle de fragments de métal chaud ou de l'addition de mélasse (National Fire Protection Association, 1978), de déplacements d'humidité et aussi des couches extérieures chaudes (plus de 150 °C) des granulés qui sont faiblement compressibles (Friedrich, 1980).

Avoine (***Avena sativa*** **L.**)

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau :

Sec : jusqu'à 14 %

Gourd : de 14,1 à 17,0 %

Humide : au-dessus de 17,0 %

Directives de conservation : La teneur en eau maximale recommandée pour la conservation de l'avoine est de 13,0 % pour une durée de 1 an et de 11,0 % pour 5 ans (Hall, 1980). Une teneur en eau de 13,0 % s'équilibre avec une humidité relative de 70 %, à 25 °C (tableau 15). À ce niveau d'humidité relative, les moisissures se développent lentement, si bien que pour un entreposage de longue durée, la teneur en eau doit être tenue au-dessous de 13,0 %, en prévision d'une humidité éventuelle et des changements de température qui se produisent avec le temps. Si l'on dispose d'une aération, une teneur en eau de 13,0 % convient à un entreposage de longue durée. D'une façon générale, l'avoine ne doit pas contenir plus de 14 % d'eau au moment de l'entreposage, sinon, elle risque de devenir moisie et de s'endommager à la chaleur en raison de l'activité des moisissures. Ces modifications réduisent sa valeur alimentaire pour le bétail et peuvent même la rendre impropre à l'alimentation humaine (Stanton, 1959). Avec des teneurs en eau comprises entre 15 et 17 %, l'avoine doit être refroidie à 15 et 5 °C, respectivement, de façon à éviter le développement des moisissures pendant l'entreposage à moyen terme (45 semaines) (Kreyger, 1972).

Les limites de conservation sont analogues pour l'avoine avec ou sans balle aux niveaux d'humidité relative inférieurs à 90 % (équivalant à 18,5 % de teneur en eau à 25 °C), mais l'avoine sans glume est plus sujette à l'infestation par les acariens. Aux teneurs en eau en équilibre avec une humidité relative de 90 % ou plus, l'avoine sans glume est plus vulnérable à l'infestation par les moisissures d'entreposage et à la diminution de viabilité que l'avoine avec glume (Sinha et coll., 1979). Les niveaux de rancissement hydrolytique apparaissant dans l'avoine entreposée avec ou sans ces glumes, ont fait l'objet d'une étude par Welch (1977). Le rancissement hydrolytique a montré une augmentation à mesure que la teneur en eau s'accroît et que la durée d'entreposage se prolonge, mais son niveau dans l'avoine sans glume ne dépassait celui de l'avoine avec glume que si le grain était très écrasé.

Directives de séchage : La température maximale de séchage est de 50 °C pour l'avoine destinée à la semence, de 60 °C pour l'utilisation commerciale et de 80 à 100 °C pour l'alimentation des animaux (Friesen, 1981).

Facteurs de déclassement : L'avoine est déclassée lorsqu'elle contient d'importantes quantités de grains chauffés, brûlés en entreposage ou pourris, ou lorsqu'elle présente une odeur nettement moisie ou de brûlé. Les échantillons contenant des grains chauffés et pourris sont déclassés numériquement jusqu'à un maximum combiné de 10 %. L'avoine est classée *Échantillon* si elle contient plus de 10 % de grains échauffés, plus de 10 % de grains franchement pourris ou plus de 0,5 % de grains brûlés ou si elle présente une odeur d'échauffement, ou nettement une odeur de moisi ou de brûlé.

Apparence des grains échauffés ou pourris : Lorsqu'on retire leur balle, les grains d'avoine chauffés ont un germe décoloré et un gruau nettement brun ou orange. Les grains d'avoine très chauffés ont une odeur de brûlé et/ou une glume orange ou brune très prononcée. L'avoine pourrie est de couleur gris foncé ou noire et spongieuse au toucher.

Problèmes d'entreposage : Les cas d'auto-échauffement de l'avoine sont rares. Cependant, un cas d'auto-inflammation s'est produit dans une cellule d'élévateur contenant de l'avoine, selon le Grain Dealers Mutual Insurance Company (1961) et dans une cellule d'avoine humide, selon Bowes (1984). Les niveaux de température, de CO_2, de microflore et autres, dans l'avoine entreposée après avoir été moissonnée pendant un automne humide, ont été surveillés par Mills et Wallace (1979). Les niveaux maximaux atteints dans des tas à l'extérieur ont été de 32 °C, (température ambiante de 12 °C) et de 15,5 % de CO_2, et dans les cellules d'entreposage, ces niveaux ont été de 37 °C (température ambiante moins 4 °C) et de 2,0 % de CO_2.

Arachides (***Arachis hypogaea*** **L.**)

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Directives de conservation : La teneur en eau recommandée pour la conservation des arachides non décortiquées, est de 9 %, tandis qu'elle est de 7 % pour les arachides décortiquées, pour des températures allant jusqu'à 27 °C (Muckle et Stirling, 1971). Dans les arachides décortiquées, une humidité relative intergranulaire de 70 % s'équilibre avec une teneur en eau de 7 %, à 25 °C (Pixton, 1982). L'arachide diffère des céréales, des légumes secs et des graines oléagineuses par le fait que la fleur est fertilisée au-dessus du sol et que le fruit qui se développe s'abaisse et se développe dans le sol. Les graines d'arachides peuvent donc être envahies par des moisissures aériennes, des moisissures terrestres et des moisissures intermédiaires, y compris l'*Aspergillus flavus*, à la fois au-dessus et au-dessous du sol (Martin, 1976).

Directives de séchage : La température maximale recommandée pour la conservation selon Hall (1980) est de 32 °C pour les arachides destinées à la semence ou à l'utilisation commerciale, mais Muckle et Stirling (1971) recommandent un maximum de 37 °C pour les graines destinées à la semence.

Problèmes d'entreposage : Il est nécessaire de procéder avec soin à la récolte et à l'entreposage des arachides de façon à réduire l'infestation fongique par l'*Aspergillus flavus* et le développement d'aflatoxines (Martin, 1976). La production de toxines est réduite par le séchage artificiel (Jackson, 1967).

L'auto-échauffement favorisé par la présence de graines endommagées et par l'humidité peut se produire lorsque les arachides sont entreposées en tas importants. Ce phénomène se révèle souvent par une odeur déplaisante qui émane des stocks en décomposition. Pour prévenir l'échauffement, les tas doivent être limités à une hauteur comprise entre 2,4 et 3,0 m et une largeur de 6 m. Des espaces vides doivent être pratiqués entre les tas afin de permettre le passage des équipes de lutte contre le feu. Toutes les graines humides doivent être parfaitement desséchées avant d'être mises en tas. Les graines doivent être maintenues sèches au moyen d'une ventilation importante. À l'air libre, les tas doivent être situés sur un emplacement bien drainé et être protégés contre la pénétration de l'humidité. Dans la mesure du possible, les graines endommagées doivent être maintenues à l'écart en tas plus petits. Il faut surveiller la température des tas à intervalles réguliers. Lorsque l'échauffement a atteint la température de 80 °C, cette température a des chances de continuer à monter jusqu'à ce que se produise l'inflammation. C'est pour cette raison qu'il ne faut pas ouvrir les tas avant l'arrivée des pompiers. Pour éteindre l'incendie, il faut arroser les feux sans atteindre les tas restés intacts (National Fire Protection Association, 1954).

Les arachides peuvent être endommagées par l'eau de condensation qui se rassemble sur le toit des conteneurs, à cause des gradients de température qui se produisent au cours du transport. Cette eau de condensation s'égoutte sur les couches supérieures qu'elle endommage. Pour éviter ces inconvénients, on a incorporé du chlorure de calcium dans les couches supérieures d'une cargaison d'arachides non décortiquées contenant 8,5 % d'eau et chargées dans des conteneurs en Israël (Navarro et coll., 1982). La teneur en eau des arachides de la couche supérieure du conteneur-témoin, non traité, est montée jusqu'à 10,2 % tandis que dans le conteneur traité au moyen de 60 kg de chlorure de calcium, elle s'abaissait au niveau de 8,0 %. Dans les conteneurs non traités, il se produisit des dommages considérables causés par les moisissures.

Problèmes de séchage : Le séchage des arachides présente un problème particulier, car la saveur du produit en fin de traitement est d'une importance majeure (Freeman, 1980). Afin de réduire la teneur en aflatoxines, il est recommandé de sécher rapidement les arachides (Jackson, 1967).

Étude de cas : En avril 1985, près de Bombay (Inde), un tas de 30 à 40 t d'arachides non décortiquées et en sacs reposait sur le sol. On le recouvrit d'une bache imperméable. Les arachides récoltées 6 mois auparavant avaient une teneur en eau moyenne de 8 % et les sacs de jute d'une contenance de 35 kg formaient des piles de 20 à 25 sacs de hauteur. On n'avait aménagé aucun espace entre les sacs et prévu aucune surveillance de la température des sacs. Au cours du mois de mai, 4 semaines après le début de l'entreposage, la pile de sacs était totalement consumée par le feu qui avait pris son origine à l'intérieur du tas. Pendant l'entreposage, la température maximale moyenne journalière de la région avait été de 38 °C, avec un maximum à 42 °C (L.R. Sutar, comm. pers., 1986).

Erreurs commises :

- La teneur en eau était trop élevée pour une conservation à 38 °C, et au-dessus, car certaines des arachides en particulier avaient une teneur supérieure à 8 %, ce chiffre étant une moyenne générale.
- on n'avait prévu aucune ventilation permettant de réduire les effets de la température et des migrations d'humidité;
- le tas était probablement trop gros;
- le tas n'avait fait l'objet d'aucune surveillance de la température et des autres modifications.

Pois (***Pisum sativum*** **var.** ***arvense*** **(L.) Poir.)**

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau :
Sec : jusqu'à 16 %

Gourd : de 16,1 à 18,0 %

Humide : au-dessus de 18,0 %

Directives de conservation : Les pois sont récoltés lorsqu'ils sont mûrs et durs à l'intérieur des cosses. Les cultivars à grains jaunes sont récoltées à partir de 16,0 % de teneur en eau. Les cultivars à grains verts sont récoltées à 18,0 % de teneur en eau ou plus afin de maintenir une couleur agréable, puis séchés jusqu'au niveau de 16,0 % (ou moins) de teneur en eau en vue d'une bonne conservation (Agriculture Manitoba, 1986).

Directives de séchage : Les températures maximales citées par Friesen (1981) sont de 45 °C pour les pois destinés à la semence, de 70 °C pour l'utilisation commerciale et entre 80 et 100 °C pour l'alimentation du bétail, tandis que Campbell et coll. (1977) recommandent 43 °C et 71 °C respectivement pour la semence et pour l'utilisation commerciale. Des températures supérieures à 45 °C nuisent à la germination, surtout celle des pois verts.

Facteurs de déclassement : Les pois sont déclassés en catégorie *Échantillon* s'ils contiennent plus de 0,2 % de graines chauffées ou s'ils présentent une odeur d'échauffement, de brûlé ou une odeur nette de moisi.

Apparence des graines chauffées : Les pois chauffés ont des téguments ternes et des cotylédons dont la couleur varie du brun roux pâle au brun foncé.

Problèmes d'entreposage : Les pois avec une teneur en eau d'environ 15 % peuvent développer une croûte superficielle pendant l'hiver à la suite d'un déplacement d'humidité ou d'infiltration de neige, en particulier lorsqu'ils ont été entreposés chauds, sans aération. Les graines s'agglomèrent, et si l'on n'en prend pas soin, prennent une couleur noire

résultant de l'activité des moisissures. Pour éviter l'agglomération des pois, il faut périodiquement marcher à la surface du chargement de la cellule ou remuer à la pelle les 30 premiers centimètres du chargement.

Avant de retirer la première charge au printemps, il faut examiner la surface du chargement et retirer à la pelle toute croûte noire qui, sinon, risquerait de se mélanger à la charge et de la gâter. La formation de croûtes est un problème particulier aux cellules de métal remplies à l'excès. Elle se produit également dans les stocks entreposés dans des huttes de Quonset, mais on peut y remédier en utilisant une chargeuse frontale pour diviser les stocks et remuer les couches superficielles (F. Beaudette, comm. pers., 1986). Les pois, étant de grande dimension et de forme ronde, exercent une plus grande pression latérale que le blé, si bien que si l'on utilise pour des pois des cellules d'entreposage destinées au blé, il peut être utile de les renforcer. (Winnipeg Free Press, 1978).

Étude de cas : À la fin du mois d'octobre 1985, dans une graineterie du sud du Manitoba, un ouvrier déchargea des pois cassés d'une cellule de 4,3 sur 8,2 m contenant 54 t. Les pois étaient chauds au toucher et environ 10 % avaient pris une coloration brune. Ces pois avaient été récoltés 2 mois plus tôt et entreposés en même temps que des débris de cosses, des matières hétéroclites et des graines de mauvaises herbes et l'on se demanda s'il ne risquait pas de se trouver des toxines dangereuses et des moisissures dans les pois chauffés.

Méthodes de traitement utilisées :

- Pendant 2 mois, les pois n'ont été soumis à aucun traitement.
- Des échantillons ont été prélevés à la partie inférieure de la cellule et envoyés pour des analyses de moisissures, de toxines et de valeur nutritionnelle.

Erreurs commises

- La cellule d'entreposage n'aurait pas dû être remplie jusqu'au sommet, car cette pratique rend les stocks difficiles à surveiller.
- Les débris n'auraient pas dû être laissés avec les pois pendant une période aussi prolongée.
- On n'a effectué aucune détermination de teneur en eau sur les matières à leur arrivée et on n'a fait aucune surveillance des stocks.

Méthodes recommandées :

- Des échantillons auraient dû être prélevés sur chaque charge, de façon à déterminer la teneur en eau présente.
- Les matières auraient dû être nettoyées aussitôt après entreposage, puis aérées.
- Les pois auraient dû être surveillés à intervalles réguliers : sondage, vérification de la température des graines, extraction d'une certaine quantité et recherche des signes de détérioration.

Pavot (*Papaver somniferum* L.)

Risques relatifs d'entreposage : Très élevés

Directives de conservation : Le pavot est extrêmement difficile à entreposer d'une façon normale, car il contient de grandes quantités de lipides et d'huiles insaturées. L'auto-oxydation se produit très rapidement : par exemple, l'auto-inflammation se produit dans les deux ou trois heures lorsque 2 à 3 t de pavot sont placées dans un camion. Pour cette raison, les graines de pavot doivent être entreposées en atmosphère d'azote, dans des installations spécialement conçues. Les graines de pavot sont cultivées en France pour l'industrie pharmaceutique et sont entreposées dans une installation de 4 400 t à La Grande Paroisse, dans la région de Paris. À son arrivée, la graine est à environ 40 °C, puis elle est refroidie à 15 °C par de l'air à 0 °C pendant 25 heures. Sans refroidissement, la température de la graine peut passer de 40 °C à 75 °C en 24 heures. Pour l'entreposage à long terme, des silos métalliques étanches vides, d'une contenance de 350 t et d'une hauteur de 8 m sont d'abord remplis avec de l'azote à 100 % avant d'y mettre les graines de pavot. La graine de pavot est alors entreposée et lorsque le silo est plein, le niveau d'oxygène est d'environ 2,8 %. Par mesures de sécurité, ce niveau est réduit jusqu'à une zone de 0,8 à 0,4 % pendant l'entreposage, qui s'étend du 20 août au 10 juin chaque année (F. Benit, comm. pers., 1985).

Riz (*Oryza sativa* L.)

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Directives de conservation : Le riz est généralement récolté avec une teneur en eau supérieure à celle qui est recommandée pour une bonne conservation, et c'est pourquoi il est nécessaire de le faire sécher après récolte. Aux États-Unis, on considère généralement qu'une teneur en eau de 12,5 % ou moins convient à la conservation du riz (Kunze et Calderwood, 1980). La teneur en eau maximale requise pour la conservation du riz pendant 1 an est de 13 % (Hall, 1980). Pour le riz brut, non décortiqué, la teneur en eau maximale est de 14 % et pour le riz moulu, elle est de 12 %, à 27 °C (Muckle et Stirling, 1971). Pour le riz en grain entier, une humidité relative intergranulaire de 70 %, à laquelle on peut s'attendre à l'apparition de moisissures, s'équilibre avec une teneur en eau de 14,1 %, à 25 °C (Hall, 1980). Un système commercial d'entreposage en vrac conçu pour le stockage à long terme et sans problème du riz brut doit fournir une aération appropriée, de façon à empêcher l'auto-échauffement et maintenir les grains de riz à un faible niveau de teneur en eau (environ 13,5 %) afin de les protéger des champignons et des insectes. La croissance des moisissures est empêchée à 13 % de teneur en eau au-dessous de 21,1 °C et l'activité des insectes est considérablement réduite au-dessous de 15,6 °C. Dans des environnements à forte humidité, le fonctionnement des systèmes d'aération destinés aux entreposages en vrac demande une attention constante (Steffe et coll., 1980). Pour plus de détails sur les changements physiques qui se produisent dans la masse du riz entreposé, voir Gough et coll., 1987.

Directives de séchage : La température maximale recommandée pour le séchage est de 43 °C pour le riz destiné à la semence ou à l'utilisation commerciale (Hall, 1980). Pour le riz non décortiqué, la température maximale de séchage pour une teneur en eau allant jusqu'à 20 % est de 44 °C, mais au-dessus de 20 % de teneur en eau, la température est réduite à 40 °C (Muckle et Stirling, 1971). Les caractéristiques de séchage changent suivant le type de grains, les variétés à long grain des États-Unis séchant le plus vite et le grain court séchant le plus lentement (Kunze et Calderwood, 1980).

Son de riz

Risques relatifs d'entreposage : Élevés

Directives de conservation : À 15 °C, une teneur en eau de 12 % s'équilibre avec une humidité relative de 70 % avec adsorption sur le son de riz (Pixton, 1982).

Problèmes d'entreposage : Le son de riz est particulièrement susceptible de s'auto-enflammer, car elle renferme une quantité importante d'huile oxydable (National Fire Protection Association, 1981). Des incendies attribués à l'auto-échauffement du son de riz se sont produits sur au moins trois navires. Dans l'un de ces navires, des incendies se déclarèrent dans deux cales séparées, l'un en haute mer et l'autre à l'amarrage à Avonmouth Docks, en Angleterre. Dans le premier cas, on se servit d'injection de vapeur pour maîtriser le feu, pour finir, comme dans le deuxième cas, à l'amarrage, par utiliser les projections d'eau pour éteindre l'incendie (anonyme, 1966).

De 27 à 36 millions de tonnes de son de riz contenant de 5 à 7 millions de tonnes d'huile sont produites dans le monde chaque année. Le son de riz, encore récemment réservée à l'alimentation animale, est maintenant présentée sous une forme extrudée pour la consommation humaine. Autrefois, les minotiers n'avaient pas les moyens d'empêcher les enzymes du son de se mélanger avec l'huile, provoquant ainsi la décomposition rapide de l'huile et rendant le produit impossible à manger. Le processus d'extrusion stabilise le produit en utilisant les phénomènes de frottement pour créer de la chaleur qui détruit les enzymes et les empêche de détériorer l'huile, tout en permettant une extraction économique. Enfin, l'extraction des huiles oxydables rendra le son de riz moins dangereuse à transporter.

Seigle (*Secale cereale* L.)

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau :
- Sec : jusqu'à 14,0 %
- Gourd : de 14,1 à 17 %
- Humide : au-dessus de 17,0 %

Directives de conservation : Du fait que le seigle mûrit au début de l'été, sa teneur en eau atteint plus rapidement un niveau acceptable pour la conservation, par comparaison avec celle du blé ou d'autres grains (Shands, 1959). Pour éviter la détérioration, on doit empêcher la teneur en eau du seigle de dépasser le niveau de 13 % (Rozsa, 1976). Kreyger (1972) recommande 14 % comme niveau maximal pour la conservation du seigle. Avec cette teneur en eau, l'entreposage à long terme du seigle demande un refroidissement à 15 °C ou moins. Des moisissures se développent rapidement dans les graines entreposées avec plus de 14 % de teneur en eau. Par exemple, des moisissures sont apparues dans des grains entreposés à 25 °C avec 15 % de teneur en eau, après 4 semaines seulement d'entreposage.

Directives de séchage : Les températures de séchage maximales sont de 45 °C pour le seigle destiné à la semence, de 60 °C pour l'utilisation commerciale et entre 80 à 100 °C pour l'alimentation du bétail (Friesen, 1981).

Facteurs de déclassement : Le grain de seigle est déclassé numériquement s'il contient des grains brûlés ou chauffés ou s'il présente une odeur de brûlé ou d'échauffement. Le seigle est classé dans la catégorie *Échantillon* s'il contient des grains brûlés ou plus de 5 % de grains chauffés, ou s'il présente une odeur de brûlé ou d'échauffement.

Apparence des grains brûlés ou échauffés : Les grains brûlés sont ceux qui ont été carbonisés ou roussis par le feu. Des grains chauffés sont d'une couleur allant de l'orange au brun foncé, quelque peu semblable à celle de l'orge chauffée, mais sont difficiles à détecter à cause des variations de couleur entre échantillons de seigle. Le seigle chauffé est souvent détecté grâce à une odeur d'échauffement ou à la présence d'autres grains de céréales chauffés dans l'échantillon.

Graines de carthame (*Carthamus tinctorius* L.)

Risques relatifs d'entreposage : Modérés

Normes de teneur en eau :
- Sec : jusqu'à 9,5 %
- Gourd : de 9,6 à 13,5 %
- Humide : de 13,6 à 17,0 %
- Trempé : de 17,1 à 22,0 %
- Mouillé : au-dessus de 22 %

Directives de conservation : La graine de carthame est écrasée pour donner de l'huile ou utilisée pour l'alimentation des oiseaux. On la cultive dans les régions sèches de l'Ouest canadien et aux États-Unis. On préfère la moissonner directement plutôt que de se servir d'une andaineuse et le décorticage n'est pas un problème si la récolte est moissonnée à 10 % de teneur en eau ou plus. La graine de carthame est entreposée entre 9 et 10 % de teneur en eau (Wilkins, 1985*b*). En Californie, Heaton et coll. (1978) ont montré qu'il se produisait un accroissement du niveau des acides gras libres dans les graines de carthame intactes ou endommagées entreposées avec plus de 8 % de teneur en eau pendant 2 mois. Cette augmentation des acides gras libres est causée en grande partie par des champignons des champs. Selon Christensen et Sauer (1982), une humidité relative intergranulaire de 65 à 70 % s'équilibre avec une

teneur en eau entre 5 et 6 %, et une humidité relative allant de 70 à 75 % s'équilibre avec 6 à 7 % de teneur en eau. La croissance d'*Aspergillus glaucus* spp. se produit avec 6 ou 7 % de teneur en eau, et la croissance du *Penicillium* spp. et autres champignons, entre 10 et 12 % de teneur en eau (équivalant à 85–90 % d'humidité relative).

Facteurs de déclassement : Les graines de carthame sont déclassées numériquement si elles contiennent des graines endommagées par la chaleur ou si elles présentent une odeur d'échauffement ou si elles contiennent des grains pourris qui sont considérés en combinaison avec des grains endommagés par la chaleur. La graine de carthame est classée dans la catégorie *Échantillon* si elle contient plus de 1 % de grains endommagés par la chaleur ou 1 % de grains pourris ou avec une odeur d'échauffement.

Criblures

Les criblures en granulés ont une composition variable comprenant par exemple des criblures n° 1 et n° 2, provenant d'élévateurs (grains divers, criblures de lin ou d'orge, graines de mauvaises herbes, balles, etc.) ou des criblures rejetées (y compris la poussière), des mélasses, de la vapeur, des vitamines plus un liant, souvent de l'orge moulue et quelquefois des grains brûlés récupérés.

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau : Il n'existe pas d'obligation d'indication de la teneur en eau pour les criblures en granulés.

Directives de conservation : On considère, d'une façon générale, que la teneur en eau à observer pour la conservation des criblures en granulés est comprise entre 8 et 10 %.

Sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.)

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau : Les limites maximales de teneur en eau pour les catégories U.S. n° 1, 2, 3 et 4 pour toutes les classes de sorgho sont de 13, 14, 15 et 18 % respectivement (United States Department of Agriculture, 1978).

Directives de conservation : Le sorgho, également connu sous le nom de millet, est une céréale. Ses grains sont plus petits et plus arrondis que ceux du maïs, contiennent plus de protéines, moins de matières grasses et ont à peu près la même teneur en hydrates de carbone. Le sorgho est cultivé principalement dans des régions semi-arides pour l'alimentation de l'homme et de l'animal. Aux États-Unis, on le cultive pour l'alimentation animale, principalement au Texas et au Kansas. La teneur maximale en eau recommandée pour la conservation du sorgho est de 13 % pour 1 an et entre 10 et 11 % pour 5 ans (Hall, 1980). Selon Muckle et Stirling (1971), la teneur en eau recommandée pour la conservation du sorgho à 27 °C est de 13,5 %, mais ce chiffre peut varier considérablement selon les variétés. Dans le sorgho, une humidité relative intergranulaire de 70 % s'équilibre avec une teneur en eau de 13,8 %, à 25 °C (tableau 15) (Hall, 1980). Aux États-Unis, le sorgho est récolté à partir de ses tiges dressées, au moyen d'une moissonneuse-batteuse. Le grain est physiologiquement mûr quand les grains les plus verts descendent à 35 % de teneur en eau, mais la récolte ne doit pas être faite tant que les grains n'ont pas atteint une teneur maximale de 13 % d'eau, à moins d'employer des moyens de séchage artificiel (Kramer, 1959). Le sorgho s'entrepose facilement si l'on observe les techniques de traitement utilisées habituellement pour les céréales. Pour plus de renseignements sur l'entreposage du sorgho, voir Doggett (1970) et Sorensen et Person (1970).

Directives de séchage : Les températures maximales recommandées pour le séchage du sorgho sont les suivantes : 43 °C pour la semence; 60 °C pour l'utilisation commerciale; et 82 °C pour l'alimentation du bétail (Hall, 1980).

Graines de soja (*Glycine max* (L.) Merrill)

Risques relatifs d'entreposage : Modérés

Normes de teneur en eau :

- Sec : jusqu'à 14,0 %
- Gourd : de 14,1 à 16,0 %
- Humide : de 16,1 à 18,0 %
- Trempé : de 18,1 à 20,0 %
- Mouillé : au-dessus de 20,0 %

Les teneurs en eau maximales admises pour les graines de soja de catégorie US no 1, 2, 3 et 4 sont de 13, 14, 16 et 18 %, respectivement (United States Department of Agriculture, 1978).

Directives de conservation : En automne, par temps sec, les graines de soja mûres sèchent dans le champ en passant de 15 % de teneur en eau en début de matinée à 10 % à l'heure du midi

Tableau 20 Durée de conservation des graines de soja de différentes teneurs en eau (d'après Hollman et Carter, 1952)

Teneur en eau (%)	Usage commercial	Semence
10-11	4 ans	1 an
10-12,5	1 à 3 ans	6 mois
13-14	6 à 9 mois	Douteuse (vérifier la germination)
14-15	6 mois	Douteuse (vérifier la germination)

(Holman et Carter, 1952). La nuit, elles absorbent à nouveau de l'humidité et le cycle se répète le jour suivant. Les graines de soja peuvent être récoltées avec une faible teneur en eau, mais au prix d'un accroissement des pertes dans le champ et de lourds dommages d'origine mécanique. Ces pertes peuvent être réduites si les graines sont récoltées avec une teneur en eau supérieure avant que les enveloppes soient complètement mûres à condition de les sécher après afin d'obtenir une teneur en eau convenant à l'entreposage.

La teneur en eau qui convient à une utilisation commerciale est de 13 % pour un entreposage allant jusqu'à 1 an (Hall, 1980), et entre 10 et 11 % pour l'entreposage à long terme, jusqu'à 4 ans (tableau 20) (Holman et Carter, 1952), et enfin de 10 % pour une durée allant jusqu'à 5 ans (Hall, 1980). Ces chiffres ne constituent que des directives générales qui ne tiennent pas compte de circonstances particulières comme l'accumulation de particules fines sous les canalisations de goulottes. Les graines de soja sont plus difficiles à entreposer que le maïs décortiqué, à la même température et avec la même teneur en eau, car la teneur en eau de la graine de soja qui s'équilibre avec une humidité relative de 65 %, à 25 °C, est presque de 11 %, soit 2 % de moins que celle du maïs décortiqué (Barre, 1976).

Les champignons d'entreposage peuvent envahir lentement les graines de soja stockées entre 12 et 12,5 % de teneur en eau à un rythme qui augmente avec la teneur en eau, au-dessus de ce dernier niveau. L'infestation des graines de soja ayant une teneur en eau de 12,5 à 13 % risque peu d'entraîner une perte de qualité dans l'espace d'un an, même si la température est favorable à la croissance des champignons, qui peuvent cependant entraîner une perte de faculté de germination. Cette infestation lente par les champignons d'entreposage des graines de soja contenant jusqu'à 13 % d'eau risque cependant d'être dangereuse, car elle peut entraîner un accroissement soudain, inattendu, peut-être impossible à maîtriser, de la croissance des champignons, joint à un échauffement (Christensen et Kaufmann, 1972).

Un silo rempli de graines de soja déjà légèrement ou modérément infestées par des champignons d'entreposage représente pour un entreposage continu un risque plus grand qu'un chargement de grains intacts, et qui progressera plus rapidement vers un état de détérioration avancé. Par ailleurs, une fois que les graines ont été modérément infestées par des champignons nuisibles, ces derniers peuvent continuer à se développer et à entraîner des dommages à des températures et teneurs en eau légèrement inférieures à ce qu'elles seraient pour des grains intacts (Christensen et Kaufmann, 1972).

Directives de séchage : Les températures maximales recommandées pour la conservation des graines de soja par Hall (1980) sont de 43 °C pour la semence, 49 °C pour l'utilisation commerciale, tandis que Muckle et Stirling (1971) recommandent des températures maximales de 38 et de 48 °C respectivement.

Facteurs de déclassement : Les graines de soja sont déclassées si elles contiennent des graines endommagées par la chaleur, moisies ou rances, ou si elles présentent une odeur d'échauffement, une odeur nette de moisi ou une odeur désagréable. Les graines échauffées sont déclassées numériquement selon les normes de classement. On tient compte des graines moisies et rances et des graines échauffées. Les graines sont classées dans la catégorie *Échantillon* si elles contiennent plus de 5 % de graines échauffées ou, si elles présentent une odeur nette d'échauffement ou une odeur de moisi.

Apparence des graines de soja échauffées, moisies et rances : Les graines échauffées ont un tégument de couleur olive à brun foncé et, après avoir été sectionnées, des cotylédons de couleur brun roux à brun foncé. Les graines moisies sont ridées, déformées, de couleur brun moyen à brun foncé et sont souvent recouvertes d'une couche de moisissure grise. Elles peuvent encore avoir une texture spongieuse et une odeur déplaisante. Enfin, les graines rances ont une décoloration rose foncé.

Problèmes d'entreposage : La plupart des cas de perte de qualité importante dans les graines de soja entreposées se produisent parce que les personnes chargées de leur conservation ne savent pas exactement les conditions qui règnent dans les différentes portions du chargement (Christensen, 1976). On doit connaître à tout moment et maintenir à des niveaux faibles la teneur en eau des graines ainsi que leur température à l'intérieur du chargement, de façon à éviter le développement des moisissures et à assurer une bonne conservation. L'état des stocks au début de leur entreposage a une influence importante sur leur possibilité de conservation future. Des problèmes d'entreposage sont aggravés si l'on entrepose des graines déjà légèrement ou modérément infestées de moisissures d'entreposage, en présence de quantités importantes de graines fendillées et fendues ou de particules fines dans l'axe des goulottes du silo. Les graines fendillées et fendues ainsi que les particules fines, particulièrement les graines de mauvaises herbes, forment des foyers où se développent des phénomènes d'échauffement entraînant une détérioration. La détérioration commence généralement dans les graines de soja dans la partie des goulottes car les graines de mauvaises herbes à forte teneur en eau s'agglomèrent en empêchant la pénétration de l'air en cours d'aération. Même si des graines, au moment de l'entreposage, contiennent seulement de 2 à 5 % de particules fines, la région des goulottes peut contenir de 50 à 80 % des particules fines (Christensen et Kaufmann, 1972).

La sudation qui se produit lorsqu'on retire du grain froid du silo et qu'on l'expose à l'air contenant une humidité relativement élevée et plus chaud d'environ 8 à 10 °C, constitue également un problème. Dans ces conditions, l'humidité de l'air se condense réellement sur les graines et lorsqu'on les remet en silo, l'effet cumulatif de cette sudation ou humidité peut entraîner des problèmes d'échauffement en cours d'entreposage (Gustafson, 1978).

Les graines de soja peuvent présenter un danger réel d'auto-inflammation car, à la différence des céréales qui en cours d'échauffement n'atteignent généralement pas la température de 55 °C, elles peuvent dépasser le niveau de 200 °C (Christensen et Kaufmann, 1972). Les graines endommagées par la chaleur perdent au moins 30 % de leur poids sec lorsque la température atteint 200 °C (Christensen et Kaufmann, 1977). Les différences entre graines de soja brûlées en cours d'entreposage ou incendiés, c'est-à-dire entre celles qui ont été soumises à un échauffement microbiologique et celles qui ont été réellement exposées au feu ou qui ont été enflammées, sont décrites par Christensen et coll. (1973) et Christensen et Meronuck (1986). Cette distinction est importante, car les compagnies d'assurance remboursent les pertes occasionnées par le feu, mais pas celles qui sont causées par l'échauffement microbiologique.

La production du monoxyde de carbone a été démontrée dans les graines de soja en cours d'échauffement par Ramstad et Geddes (1942). Plusieurs échantillons prélevés de 6 à 15 m sous la surface d'un chargement de graines de soja en cours d'échauffement ont donné des concentrations de CO mortel comprises entre 0,005 et 0,02 % (50 à 200 ppm).

Étude de cas : 1. En décembre 1950, dans un élévateur du Kentucky, une vapeur ou une fumée fut observée alors qu'elle s'échappait de plusieurs cellules contenant des graines de soja. Des colonnes de graines extrêmement chaudes, comprimées au centre des cellules et s'étendant sur presque toute la hauteur de 32 m furent découvertes lorsqu'on retira le grain intact à la périphérie. Ces colonnes durent être brisées mécaniquement de façon à permettre la sortie du grain à travers les goulottes de déchargement. Les températures maximales au centre d'une masse en échauffement allaient de 145 à 170 °C. Même dans les échantillons les plus détériorés, on ne put observer de cendres libres, ce qui indique que les températures de combustion

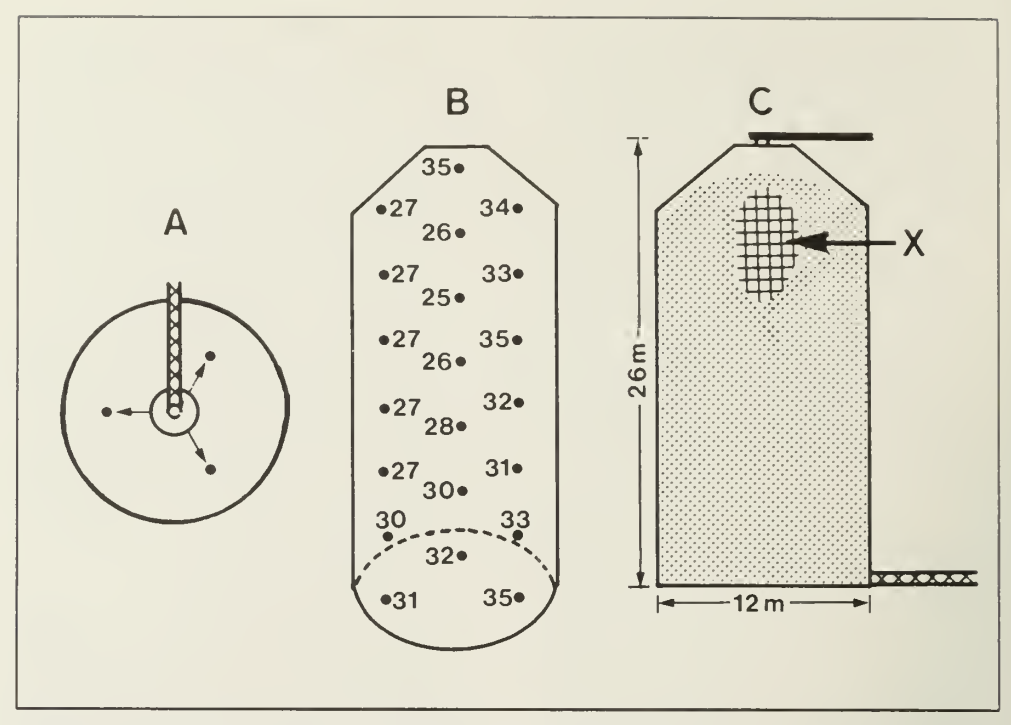


Figure 23 Schéma d'un silo contenant des graines de soja, montrant l'emplacement des dommages causés par l'échauffement : *A*, section transversale montrant l'emplacement des câbles de thermocouples; *B*, section longitudinale montrant les températures en degrés Celsius avant déchargement; *C*, section longitudinale montrant la région (X) où furent détectées les graines endommagées par la chaleur (d'après Ben-Efraim et coll., 1985).

n'avaient pas été atteintes. Les registres de l'élévateur révélèrent que de nombreux lots de graines de soja reçus 6 à 8 semaines précédemment contenaient plus de 15 % d'eau, soit une valeur supérieure à celle qui est considérée comme propre à la conservation (Milner et Thompson, 1954).

2. Une cargaison de 6 000 t de graines de soja en provenance des États-Unis fut expédiée par cargo de la Nouvelle-Orléans à un pays situé dans les Antilles. La cargaison fut déchargée par benne dans des camions puis transportée jusqu'à l'installation de traitement. À l'arrivée, les graines avaient une mauvaise odeur et certaines avaient germé, si bien qu'on arrêta le déchargement. Le directeur de l'installation savait qu'un conflit s'élèverait sur la question de savoir qui serait responsable des dommages subis par les graines, si bien qu'il appela immédiatement son avocat et son agent d'assurance, puis le transporteur et l'importateur des graines. La Food and Drug Authority envoya des inspecteurs qui déclarèrent que la cargaison entière était pourrie et ne pouvait être déchargée. Des entretiens avec le commandant et l'équipage révélèrent que deux écoutilles avaient eu des fuites au cours du voyage, par mauvais temps en provenance de la Nouvelle-Orléans. D'ailleurs, au moment où le navire atteignait sa destination, certaines des graines révélaient une teneur en eau de 48 % au lieu de celle qui était spécifiée, de 12 % (anonyme, 1983*b*).

3. En Israël, une cellule de 2 000 t de graines de soja de qualité US nº 2 contenant jusqu'à 20 % de graines fendillées et fendues, jusqu'à 3 % de graines endommagées et jusqu'à 2 % de matières étrangères, ne présenta aucun problème d'entreposage pendant 5 mois. Les températures étaient enregistrées chaque semaine, au moyen de trois câbles à thermocouples, chacun avec sept jonctions (fig. 23*a*). À la suite d'une élévation de température allant jusqu'à 35 °C à la partie supérieure de la cellule (fig. 23*b*), on décida de décharger le contenu du silo. C'est seulement au cours du déchargement qu'on réalisa qu'il y avait de 30 à 50 t de graines endommagées par la chaleur dans la partie centrale du haut de la

cellule (fig. 23*c*), une région où aucun thermocouple n'avait été placé directement. Il est probable que la thermoconductibilité faible des graines de soja avait empêché la chaleur de se dissiper rapidement, si bien que les thermocouples avaient été incapables de détecter le problème à un stade moins avancé. Dans la zone d'échauffement contenant une forte proportion de déchets et de graines fendues, la teneur en eau était de 22,4 % et le niveau des acides gras libres dépassait 35 %. Les chiffres correspondant relevés pour les graines non endommagées autour de la zone d'échauffement étaient de 12,8 % de teneur en eau et de 0,56 % de teneur en acides gras libres. La température maximale enregistrée était de 98 °C à une profondeur d'un mètre à l'intérieur de la masse des graines échauffées (Ben-Efraim et coll., 1985).

Dans Christensen et Meronuck (1986), on trouvera d'autres études de cas.

Graines de tournesol (*Helianthus annuus* L.)

Risques relatifs d'entreposage : Modérés

Normes de teneur en eau :

Sec	: jusqu'à 9,5 %
Gourd	: de 9,6 à 13,5 %
Humide	: de 13,6 à 17,0 %
Trempé	: de 17,1 à 22,0 %
Mouillé	: au-dessus de 22 %

Directives de conservation : La province du Manitoba recommande d'entreposer les graines de tournesol avec une teneur en eau allant jusqu'à 10 % en précisant qu'un niveau de 8,5 % ou moins est encore plus souhaitable. Mais, même à ce degré de teneur en eau, il peut se produire une détérioration si la température n'est pas réduite au moment où la graine est entreposée (Agriculture Manitoba, 1986). Dans le Dakota du Nord, un maximum de 9 % de teneur en eau est conseillé pour une bonne conservation (Cobia et Zimmer, 1975). À 7,0 % ou moins de teneur en eau, la graine de tournesol peut être entreposée sans aération à long terme, mais à 9,5 % de teneur en eau et au-dessus, elle ne peut être conservée qu'à court terme (Gustafson, 1978). Robertson et coll. (1984, 1985*a*) ont étudié l'effet de la teneur en eau des graines sur la croissance des champignons et la qualité des graines entreposées à 10 et 20 °C pendant jusqu'à 60 semaines. Aucune détérioration ne se produisit, que ce soit dans les graines entreposées à 10 °C avec 7,5 % de teneur en eau, ou dans les graines entreposées à 20 °C avec 6,0 % de teneur en eau. Par contre, une détérioration importante s'est produite dans les graines entreposées à 20 °C avec une teneur en eau de 9,8 % et plus, causée probablement par des champignons d'entreposage du groupes *A. glaucus*.

Lorsque les graines de tournesol atteignent leur maturité, généralement à la mi-septembre, le dos de leur tête devient jaune et les bractées qui l'entourent deviennent brunes. À ce stade, la graine a une teneur en eau d'environ 50 %, mais la récolte est généralement retardée jusqu'au moment où sa teneur en eau a atteint 12 % ou moins (Daun, 1982). Dans la plupart des régions de l'Ouest canadien, il n'est pas besoin de sécher la graine (Durksen, 1975). Du fait que les graines de tournesol peuvent être battues proprement à 20 % de teneur en eau, certains éleveurs préfèrent les récolter à ce niveau, puis les soumettre à un séchage artificiel pour obtenir un niveau de teneur en eau qui convienne à leur conservation (Daun, 1982).

Directives de séchage : Les graines de tournesol sont faciles à sécher et, en raison de leur caractère volumineux, à un coût relativement réduit (Durksen, 1975). Les températures de séchage maximales citées par Friesen (1981) sont de 45 °C pour les graines destinées à la semence, et de 50 °C pour les usages commerciaux. Durksen (1975) mentionne des températures de séchage maximales de 43, 49 et 60 °C, respectivement pour les graines de tournesol séchées par lots en débit continu non circulant et dans des séchoirs par lots avec circulation. Les températures des séchoirs par lots doivent être réduites pendant la dernière demi-heure du séchage. Il faut sécher les graines de tournesol jusqu'à un niveau de 8,5 % de teneur en eau, de façon à tenir compte d'une certaine augmentation d'humidité en cours d'entreposage.

Facteurs de déclassement : Les graines de tournesol sont déclassées si elles contiennent des grains échauffés ou brûlés en entreposage ou si elles présentent une odeur d'échauffement, de brûlé en cours d'entreposage ou de moisi. Lorsque l'on trouve en même temps des graines chauffées et des graines pourries, on tient compte des deux. Des graines de tournesol sont classées dans la catégorie *Échantillon* si elles contiennent plus de 2 % de graines échauffées ou pourries, ou si elles présentent une nette odeur d'échauffement, de moisi ou de brûlé en entreposage.

Apparence des graines chauffées : En coupe longitudinale, les graines chauffées présentent une chair de couleur brune.

Problèmes d'entreposage : La graine de tournesol, lorsqu'elle arrive des champs, contient normalement de 3 à 20 % de déchets qui doivent être retirés ainsi que les matières fines et les grosses graines vides avant d'être entreposées. L'élimination des grosses graines vides permet une utilisation maximale de l'espace dont on dispose pour l'entreposage tandis que l'élimination des matières fines évite le développement des points chauds et permet d'assurer une bonne aération.

Problèmes de séchage : Les opérations de séchage doivent être soigneusement surveillées afin d'éviter deux problèmes qui se produisent fréquemment : le séchage excessif et les incendies de séchoir (Cobia et Zimmer, 1975).

L'excès de séchage se produit parce que les opérateurs oublient ou ne savent pas que les graines de tournesol sèchent plus rapidement que les graines d'une forte densité comme celles du

maïs. L'excès de séchage peut entraîner la production de grains endommagés par la chaleur, avec une chair de couleur foncée ressemblant à celle des graines envahies par les champignons d'après récolte en cours d'entreposage. Robertson et coll. (1985*b*) ont étudié des graines de tournesol surchauffées de catégories *Échantillon* et ont noté que leur classification selon les dommages ne correspondait pas toujours exactement aux qualités de la graine de tournesol et de son huile révélées par l'analyse chimique.

Les feux de séchage se produisent lorsque des fibres très fines provenant de la graine sont libérées en cours de traitement, flottent en l'air et s'enflamment lorsqu'elles viennent à traverser le ventilateur et le brûleur en fonctionnement. Le danger est augmenté lorsque les graines sont séchées à 60 °C et plus et c'est pourquoi de nombreux fermiers préfèrent sécher les graines à des températures moins élevées. Le danger d'incendie est diminué lorsque le ventilateur propulse de l'air propre, sans fibres. On peut y parvenir au moyen d'un séchoir portatif, en tournant les ventilateurs dans le sens du vent ou en les reliant à des longs tubes de respiration sub-aquatique (Cobia et Zimmer, 1975).

Les directives à observer pour le séchage des graines de tournesol sont les suivantes :

- Suivre de bonnes méthodes d'entretien. Nettoyer les alentours du séchoir ainsi que l'intérieur de la chambre de l'appareil.
- Ne pas sécher avec excès.
- Assurer le maintien d'un débit continu dans toutes les sections des séchoirs par lots de recirculation et à débit continu, car un débit inégal entraîne la formation de points de surséchage et augmente les dangers d'incendie.
- Ne pas laisser un équipement de séchage sans surveillance.

Triticale (hybride de blé et de seigle)

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau :
Sec : jusqu'à 14,0 %

Gourd : de 14,1 à 17,0 %

Humide : au-dessus de 17,0 %

Directives de conservation : Dans le triticale, une humidité relative intergranulaire de 70 % s'équilibre avec une teneur en eau de 15,1 %, à 22 °C. Les valeurs d'équilibre entre teneur en eau et humidité relative du triticale à 22 °C sont supérieures à celles du seigle à 25 °C ou du blé à 20 ou 25 °C. Le triticale a une densité inférieure d'environ 20 % à celle du blé et de 15 % par rapport à celle du seigle, ce qui peut expliquer la valeur plus élevée de sa teneur en eau-humidité relative (Sinha et White, 1982). Nous manquons d'information sur le comportement du triticale en cours d'entreposage, mais d'après les éléments ci-dessus, il semblerait que le triticale soit moins sensible à la détérioration que le blé lorsqu'il est entreposé à la même température et avec la même teneur en eau.

Blé (*Triticum aestivum* L.)

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau :
Sec : jusqu'à 14,5 %

Gourd : de 14,6 à 17,0 %

Humide : au-dessus de 17,0 %

Directives de conservation : Dans les variétés de blé tendre rouge d'hiver, dur rouge d'hiver, dur roux de printemps et ambré dur, une humidité relative intergranulaire de

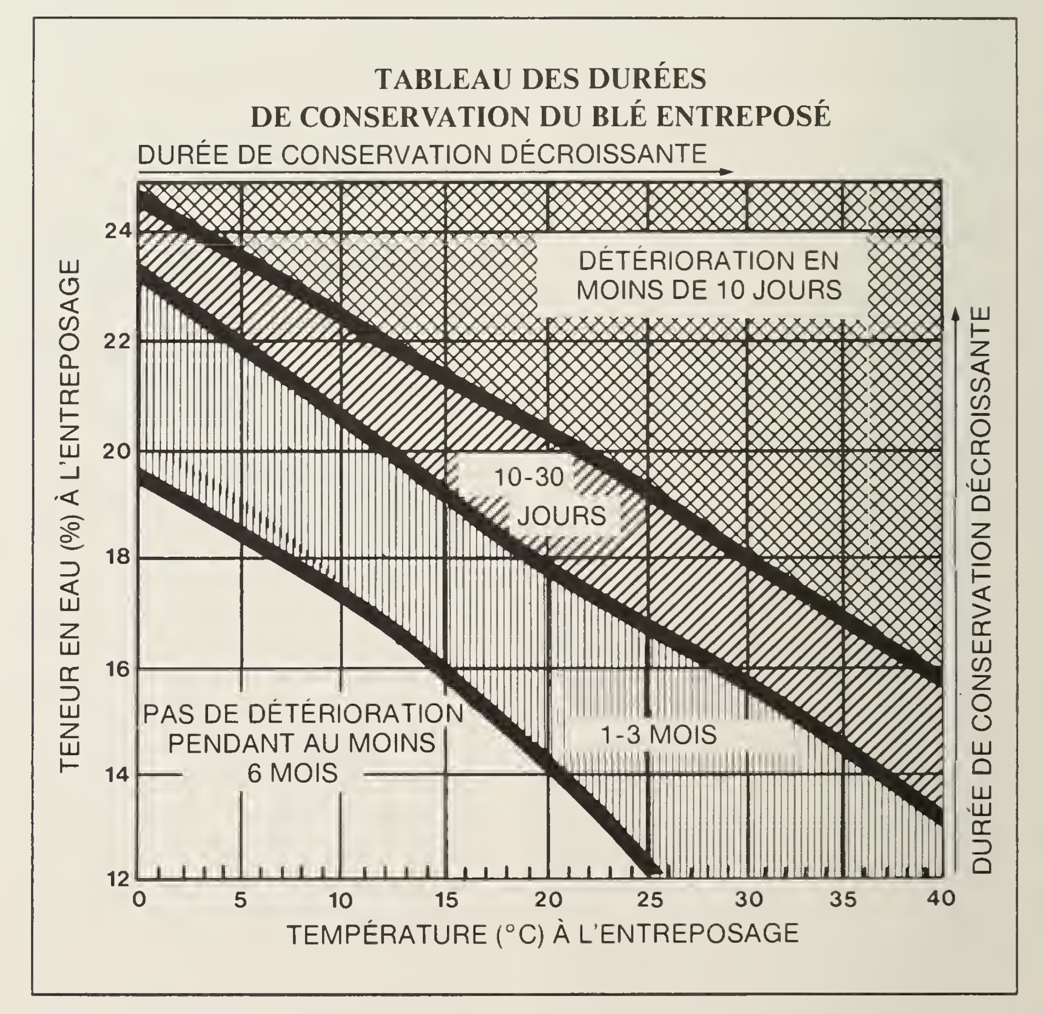


Figure 24 Tableau des durées de conservation du blé montrant les zones dans lesquelles la détérioration se produit en moins de 10 jours, entre 10 et 30 jours, entre 1 et 3 mois, et celles où ne se produit aucune détérioration pendant au moins 6 mois (d'après Wilkins, 1983).

70 % s'équilibre respectivement avec 13,5, 13,9, 13,9 et 13,7 %, à 25 °C (tableau 15). À 10 °C, 70 % d'humidité relative s'équilibre avec un blé d'une teneur en eau de 15 % (Friesen et Huminicki, 1986). Selon Hall (1980), la teneur en eau maximale pour la conservation dans une structure étanche est de 13 % pour le blé d'usage commercial et de 12 % pour le blé de semence. Pour l'entreposage à long terme du blé commercial, le maximum est de 13 à 14 % d'eau, jusqu'à 1 an de conservation et de 11 à 12 % pour 5 ans. Des directives de conservation pour le blé dur roux de printemps ont été mises au point par Wallace et coll. (1983) et résumées par Wilkins (1983). La figure 24 montre la durée des périodes pendant lesquelles le blé peut se conserver, en fonction des différentes combinaisons entre la teneur en eau et la température. En comparaison avec d'autres cultures, le blé s'entrepose facilement mais, à l'occasion, des points chauds peuvent se développer.

Directives de séchage : Les températures maximales de séchage sont de 60 °C pour le blé de semence, de 65 °C pour le blé d'utilisation commerciale et de 80 à 100 °C pour le blé destiné au bétail (Friesen, 1981). Un excès de chaleur pendant le séchage du blé peut endommager les protéines de l'endosperme et rendre ainsi la farine moins propre à son emploi en boulangerie (Freeman, 1980). Les températures recommandées pour l'air de séchage des blés de minoterie sont de 60 °C pour les séchoirs à lots sans recirculation, et pour les séchoirs à contre-débit continu, de 60 à 70 °C pour les séchoirs à lots de recirculation et de 70 °C pour les sécheuses à débit continu parallèle. La température des grains ne doit dépasser 60 °C dans aucune partie de la sécheuse.

Facteurs de déclassement : Le blé est déclassé s'il contient des grains chauffés, brûlés en entreposage, brûlés, très infestés de mildiou ou de moisissures ou s'il présente une odeur de brûlé. Le blé est classé *Échantillon* s'il contient plus de 2 % de grains brûlés, plus de 10 % de grains chauffés, brûlés en entreposage, pourris, très infestés de mildiou ou pourris, ou s'il présente une nette odeur de brûlé.

Apparence des grains : Les grains brûlés sont ceux qui ont été carbonisés ou roussis par le feu. Des grains nettement chauffés ont une couleur qui va du brun pâle au brun très foncé sans atteindre la couleur noire. Les grains brûlés en entreposage, pourris, très infestés de mildiou sont noircis, gonflés et paraissent éclatés à la suite d'un échauffement prononcé et d'une exposition à une forte humidité. De tels grains peuvent être totalement décolorés et spongieux au toucher.

Problèmes d'entreposage : Des points chauds, provoqués par l'activité des champignons ou des insectes peuvent se développer à la fin de l'automne, en particulier dans des grains non aérés. L'écologie d'un point chaud d'origine artificielle a été étudiée sur des échantillons rassemblés à partir de deux chargements de 13 t de blé entreposés à Winnipeg (Man.), entre 1959 et 1961 (Sinha et Wallace, 1965). L'échauffement fongique avait débuté l'hiver, essentiellement sous l'action d'espèces de *Penicillium* poussant à basse température qui s'étaient développées dans une poche de grains vieille de 4 mois entre –5 à 8 °C, entre 18,5 et 21,8 % de teneur en eau. Le point chaud atteignit une température de 64 °C et se refroidit en 2 semaines.

Étude de cas : 1. À Cairo (Ill.), une cellule de grande dimension avait été remplie de blé récolté entre 27 et 32 °C. D'après les livres, la teneur en eau moyenne était de 13,2 %; cependant, une partie des grains avait été entreposée à près de 14,0 % et même à 16,0 %, du fait de l'imprécision d'un humidimètre. Au cours de l'automne frais qui suivit, il se produisit probablement un rapide transfert d'humidité dans le chargement, entraînant un échauffement lent, puis rapide, qui provoqua, pour finir, un dommage de 40 % pour les germes, une réduction à la catégorie *Échantillon* et une perte d'argent considérable. La détérioration était due au développement de champignons d'après récolte (champignons d'entreposage) et le magasinier fut jugé responsable (Christensen et Kaufmann, 1969).

2. Dans un pays du Moyen-Orient, un silo de béton haut de 30 m contenait 5 000 t de blé à 13 % de teneur en eau. Le silo était équipé de sept câbles à thermocouples contenant chacun 10 palpeurs équidistants. Ces câbles étaient situés à un mètre de la paroi du silo. Après 3 mois d'entreposage sans aération, la température mesurée le long de six de ces câbles se situait entre 24 et 36 °C mais, sur le septième, on notait entre 89 et 96 °C. Les grains en état de combustion lente entre 89 à 96 °C étaient situés sur le côté du silo exposé au soleil. Il est probable que l'échauffement avait été provoqué par un transfert d'humidité à l'intérieur du chargement, aggravé par les modifications diurnes se produisant sur le côté ensoleillé du silo.

Son, remoulages, semoules

Les *granulés de son* contiennent environ 50 % de son en gros flocons, 35 % de remoulages de taille intermédiaire et 15 % de semoule (de petite taille). Les *granulés de débris* de minoterie contiennent de 80 à 85 % de remoulages, 10 % de son remoulu et entre 5 et 10 % de criblures moulues comprenant du sarrasin, de l'orge, de l'avoine, du blé brisé, des graines de mauvaises herbes, des poussières de filtre et de farine.

Risques relatifs d'entreposage : Faibles

Normes de teneur en eau : Pas de limites fixées au Canada; doivent légalement être munis d'une étiquette indiquant la teneur en eau maximale.

Directives de conservation : Les niveaux de teneur en eau recommandés de façon générale dans l'industrie sont inférieurs à 10 % pour les *granulés de son*, et à 13,5 % pour les *granulés de débris* de minoterie pour un entreposage allant jusqu'à 3 semaines. D'après Snow et coll. (1944), le niveau de teneur en eau au-dessous duquel les moisissures ne doivent normalement pas se développer,

pour le *son* et les *semoules*, est de 14,4 % (équivalant à 72 % d'humidité relative), pour un entreposage de 3 mois, entre 15,5 et 21 °C. Pour un entreposage de 2 à 3 ans, entre 15,5 et 21 °C, le niveau de teneur en eau recommandé pour le *son* est de 12,8 % (65 % d'humidité relative) et de 13,1 % (65 % d'humidité relative) pour les semoules. Dans la pratique, les *granulés de son* fraîchement fabriqués, après refroidissement, contiennent environ 9,5 % d'eau, tandis que les *granulés de débris* de minoterie en contiennent de 13,2 à 13,6 %. Pour éviter la condensation et les problèmes de moisissures qu'ils risquent d'entraîner durant l'hiver, il faut entreposer les granulés refroidis, vérifier s'il n'y a pas de chaleur résiduelle, retourner, si c'est nécessaire, puis les charger dans les wagons. En été, on peut charger les granulés refroidis directement dans les wagons.

Apparence : Les *granulés de son* ont une teinte rosâtre, tandis que les *granulés de débris* de minoterie sont roses, mais moins foncés que les granulés de son.

BIBLIOGRAPHIE

Abramson, D., Sinha, R.N. et Mills J.T. 1983. Mycotoxin and odor formation in barley stored at 16 and 20 % moisture in Manitoba. Cereal Chem. 60:350–355.

Agriculture Canada. 1979. Intoxication agricole par les gaz. Agric. Can. Publ. 1688F, 11 p.

Aldis, D.F. et Lai, F.S. 1979. Review of literature related to engineering aspects of grain dust explosions. U.S. Dep. Agric. Misc. Publ. 1375, 42 p.

American Insurance Association. 1983. Spontaneous ignition. Amer. Insur. Assoc. Engineering and Safety Service, Special Interest Bulletin 51, 3 p.

American Society of Agricultural Engineers. 1986. Construction and rating of equipment for drying farm crops. ASAE. S. 248.3–82. *In* ASAE standards, engineering practices and data. St. Joseph MI.

Anonyme. 1966. Spontaneous ignition of rice bran. Fire International 13: 67–68.

Anonyme. 1982. Clean your grain as it is augered. Grainews. Septembre 1982. United Grain Growers, Winnipeg, Man., p. 32.

Anonyme. 1983*a*. Fishmeal strikes again. Hazardous Cargo Bulletin. Février 1983, p. 20, 24.

Anonyme. 1983*b*. Handling commodities in transit. Agribusiness Worldwide 4:45, 47–48.

Anonyme. 1985. Build your own remote monitor to measure bin/barn temperatures. Country Guide. Février 1985, p. 35.

Bailey, C.H. 1940. Respiration of cereal grains and flaxseed. Plant Physiol. 15:257–274.

Baker, D.E. 1963. Fire in baled cotton. Cotton Warehouse Inspection Service, Memphis, TN. Polycopié. 5 p.

Barre, H.J. 1976. Storage and quality control of soybeans on the farm. p. 734–744. *In* L.D. Hill (éditeur) World Soybean Research. Proceedings of the World Soybean Research Conference. Interstate Printers and Publ. Inc., Danville, ILL.

Beever, P.F. et Thorne, P.F. 1982. Isothermal methods for assessing combustible powders. Part I. Theoretical and experimental approach. Part II. Practical case histories. Building Research Establishment Current Paper CP5/82 Borehamwood, Royaume-Uni, 14p.

Bellman, H.E. 1982. Choix et utilisation des silos hermétiques. Agric. Can. Publ. 1728F. 13 p.

Ben-Efraim, A., Lisker, N. et Henis, Y. 1985. Spontaneous heating and the damage it causes to commercially stored soybeans in Israel. J. Stored Prod. Res. 21:179–187.

Bond, E.J. 1984. Manual of fumigation for insect control. FAO Plant production and protection paper 54. FAO, Rome, 432 p.

Boumans, G. 1985. Grain handling and storage. Developments in Agricultural Engineering 4. Elsevier, Amsterdam, 436 p.

Bowen, J.E. 1982. Phenomenon of spontaneous ignition is still misunderstood by some. Fire Engineering. Mai 1982. p. 42–46.

Bowes, P.C. 1984. Self-heating: evaluating and controlling the hazards. Elsevier, Amsterdam. 500 p.

Brady, R.J. & Co. 1979. Marine fire prevention, firefighting and fire safety, R.J. Brady Co., Bowie, MD, 388 p.

Brickey, P.M. Jr., et Vazquez, A.W. 1977. Court testimony p. 137–145. *In* J.R. Gorham (éditeur) Training Manual for analytical entomology in the food industry. FDA Tech. Bull. 2. Washington, DC.

Briggs, D.E. 1978. Barley. Chapman et Hall, Londres. 612 p.

Broadhurst, D. 1985. Better safe than dead when handling grain. Grainews, Février 1985. United Grain Growers, Winnipeg.

Burg, W.R., Shotwell, O.L. et Saltzman, B.E. 1982. Measurements of airborne aflatoxins during the handling of 1979 contaminated corn. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 43:580–586.

Burrell, N.J. 1970. Conditions for safe grain storage. Home Grown Cereals Authority, Londres, Royaume-Uni. Technical Note 16, 3 p.

Burrell, N.J., Knight, G.P., Armitage D.M. et Hill, S.T. 1980. Determination of the time available for drying rapeseed before the appearance of surface molds. J. Stored Prod. Res. 16:115–118.

Byrd, G.J. et Stults, T. 1976. The expert witness: a dilemma. J. Forensic Sciences 21:944–948.

Calverley, D.J.B. et Hallam J.A. 1982. Problems of storing grain from temperature climates in tropical countries including a recent case history p. 143–150. *In* P. Finlay (éditeur) Grain-trade, transportation and handling. Proc. of the GrainTrans'82 Conference, Londres. CS Publications, Worcester, Pk, Londres, Royaume-Uni.

Campbell, J.K. 1973. Who wants a 20 by 60 fireplace? Hoards Dairyman. 25 mai, 1973. p. 677, 684.

Campbell, C., Dedio, W., Frugal, J.F., Helgason, S.B., Rogalsky, J.R. et Stefansson, B.R. 1977. Field crops p. 91–131. *In* L.C. Buchanan (éditeur) Principles and practices of commercial farming. University of Manitoba, Winnipeg, 520 p.

Canadian Coast Guard. 1984. Code of safe practice for solid bulk cargoes. Ottawa, Publ. TP5761E, 102 p.

Canadian Grain Commission. 1987. Official grain grading guide, 1987 ed. Can. Grain Comm., Winnipeg, Manitoba, 253 p.

Canola Council of Canada. 1974. Rapeseed, Canada's cinderella crop. Rapeseed (Canola) Council of Canada, Winnipeg, Publ. 33. 52 p.

Canola Council of Canada. 1981. Canola storage. Canola Council of Canada, Winnipeg. Canola farming fact sheet no. 4. 2 p.

Charles, O.W. 1985. Feed bin maintenance. Poultry Tips Février 1985. University of Georgia College of Agriculture, PS1–2.

Christensen, C.M. 1976. Maintaining quality of soybeans during storage p. 724–730. *In* L.D. Hill (éditeur) World soybean research. Proceedings of the World Soybean Research Conference. Interstate Printers and Publishers, Danville, ILL.

Christensen, C.M. et Kaufmann, H.H. 1969. Grain Storage. The role of fungi in quality loss. Univ. Minn. Press, Minneapolis, MN. 153 p.

Christensen, C.M. et Kaufmann, H.H. 1972. Biological processes in stored soybeans p. 278–293. *In* A.K. Smith et S.J. Circle (éditeurs) Soybeans: chemistry and technology. Vol. 1, Proteins. AVI, Westport, CT.

Christensen, C.M. et Kaufmann, H.H. 1977. Spoilage, heating, binburning and fireburning: their nature, cause and prevention in grain. Feedstuffs. 24 octobre, 1977. p. 39 et 47.

Christensen, C.M. et Kaufmann, H.H. 1978. Spoilage of corn in ship transport. Feedstuffs. 13 février, 1978, p. 28 et 32.

Christensen, C.M. et Meronuck, R.A. 1986. Quality maintenance in stored grains and seeds. Univ. Minn. Press, Minneapolis, MN, 138 p.

Christensen, C.M. et Sauer, D.B. 1982. Microflora p. 219–240. *In* C.M. Christensen (éditeur) Storage of cereal grains and their products. Amer. Assoc. Cereal Chem., St. Paul, MN.

Christensen, C.M., Meronuck, R.A., Steele, J.A. et Behrens, J.C. 1973. Some morphological and chemical characteristics of binburned and fireburned soybeans. Trans. Amer. Soc. Agric. Eng. 16:899–901.

Cloe, W.W. 1983. Selected occupational fatalities related to grain handling as found in reports of OSHA fatality/ catastrophe investigations. U.S. Dept. of Labour, Occupational Safety and Health Admin., Washington, DC. 182 p.

Clancy, R. 1979*a*. Storage characteristics of some feeding stuffs. Milling Feed and Fertilizer 162(1):19–20.

Clancy, R. 1979*b*. Storage characteristics of some feeding stuffs. Milling Feed and Fertilizer 162(2):35–36.

Cobia, D. et Zimmer, D. 1975. Sunflowers. Production, pests and marketing. North Dakota State University, Extension Bulletin 25. 59 p.

Cook, C.M. 1964. The role and rights of the expert witness. J. Forensic Sciences 9:456–460.

Cotton, R.T. et Wilbur, D.A. 1982. Insects p. 281–318. *In* C.M. Christensen (éditeur) Storage and cereal grains and their products. Amer. Assoc. Cereal Chem., St. Paul, MN.

Darby, P.H. 1973. Foam, CO_2, and water used against deep fire in maize cargo. Fire. Mai 1973. p. 637.

Daun, J.K. 1982. Oilseeds-production p. 749–792. *In* Grains and oilseeds, handling, marketing and processing. Canadian International Grains Institute, Winnipeg, 1006 p.

Davis, R. et Barrett, R.H. 1986. In-transit shipboard fumigation of grain: research to regulation. Cereal Foods World 31:227–229.

Dennett, M.F. 1980. Fire investigation. Pergamon Press, Oxford, 104 p.

Dennis, C.A.R. 1973. Health hazards of grain storage. p. 367–387. *In* R.N. Sinha et W.E. Muir (éditeurs) Grain storage: part of a system. AVI, Westport, CT.

Dickson, A.D. 1959. Barley p. 76–95. *In* S.A. Matz (éditeur) The chemistry and technology of cereals as food and feed. AVI, Westport, CT.

Dinglinger, G. 1981. Inertisierung von silos durch stickstoff im schadensfalle (Extinguishing a silo fire by nitrogen purging). Getreide Mehl und Brot 35:321–323 (en allemand).

Doggett, H. 1970. Sorghum. Tropical agriculture series. Longmans, Londres, Royaume-Uni. 403 p.

Durksen, D. 1975. Production of sunflowers in western Canada. p. 255–277. *In* J.T. Harapiak (éditeur) Oilseed and pulse crops in western Canada — a symposium. Western Cooperative Fertilizers Ltd., Calgary.

Evans, L.E. et Rogalsky, J.R. 1974. Fababean production, Manitoba Department of Agriculture, Winnipeg, Man., 9 p.

Fire Protection Association. 1954. Spontaneous heating in groundnuts. F.P.A. Journal No. 26:256–257.

Fire Protection Association. 1968. Fire safety with silos. F.P.A. Journal No. 78, Mai. p. 37–39.

Fire Protection Association. 1978. The fire risks to industry from spontaneous heating. Fire prevention. No. 126. Août, p. 26–29.

Fire Protection Association. 1986. Cargo ship fire. MV Ebn Magid, English Channel. Fire Prevention. No.191. Juillet-Août, p. 48–49.

Foster G.H. et Tuite, J.T. 1982. Aeration and stored grain management p. 117–143. *In* C.M. Christensen (éditeur) Storage of cereal grains and their products. Amer. Assoc. Cereal Chem., St. Paul, MN.

Freeman, J.E. 1980. Quality preservation during harvesting, conditioning and storage of grains and oilseeds, pages 187–226. *In* C.S. Hoveland (éditeur) Crop quality storage and utilization. American Assoc. of Agronomy, Madison, WIS.

Freidrich, W. 1980. Zusatzstoffe und Mischfuttertechnik (Feed additives and the technology of concentrated feedstuffs) Kraftfutter 63:210–220 (en allemand).

Friesen, O.H. 1981. Séchoirs à grains à air chaud. Agric. Can. Publ. 1700F, 27 p.

Friesen, O.H. et Huminicki, D.N. 1986. Grain aeration and unheated air drying. Manitoba Agriculture Agdex 732–1. 30 p.

Gebhardt, P.D. 1983. Manutention du grain à la ferme. Agric., Can. Publ. 1713F. 25 p.

Gough, M.C. 1974. The measurement of relative humidity, with particular reference to remote long term measurement in grain silos. Trop. Stored Prod. Inf. 27:19–30.

Gough, M.C. 1980. Evaluation of a remote moisture sensor for bulk grain. J. Agric. Eng. Res. 25:339–344.

Gough, M.C.; Cheigh, H.S.; Kim, S.K.; Kwon, T.W. 1987. Physical changes in bulk stored rice. J. Agric. Eng. Res. 37:59–71.

Grain Dealers Mutual Insurance Company. 1961. Fighting fire in country grain handling properties. G.D.M.I.C. Omaha, 2nd ed. 15 p.

Grayson, R.R. 1957. Nitrogen dioxyde pneumonia: a recently discovered malady in silo fillers. GP (Amer. Acad. of General practice) 16:90–99.

Gustafson, E.H. 1978. Raw materials handling and controls. J. Amer. Oil Chem. Soc. 55:751–753.

Hall, C.W. 1980. Drying and storage of agricultural crops. AVI, Westport CT, 382 p.

Hamilton, P.B. 1985. Factors influencing activity of fungi and antifungal agents in poultry feed. P. 207–218. *In* Lacey, J., éditeur. Trichothecenes and other mycotoxins. John Wiley, Londres, Royaume-Uni. 571 pp.

Harvestore® Products 1982. Structure operators' manual. A.O. Smith Harvestor® Products Inc., Dekalb, ILL. 43pp.

Heaton, T.C., Knowles, P.F., Mikkelsen, D.S. et Ruckman, J.E. 1978. Production of free fatty acids in safflower seeds by fungi. JAOCS. 55:465–468.

Henderson, S. 1985. The relationship between moisture content and equilibrium relative humidity of pig feed. J. Stored Prod. Res. 21:131–134.

Hesseltine, C.W. 1982. Microbial losses in field crops in international shipment. P. 187-202. In Kurata, H. et Hesseltine, C.W., éditeurs. Control of the microbial contamination of foods and feeds in international trade: Microbial standards and specifications. Saikon Publishing Co. Tokyo. 342 pp.

Hohenadel, P. 1984. Corn gets a rough ride. Country Guide, Eastern edition. Mai 1984. p. 26.

Holman, L.E. et Carter, D.G. 1952. Soybean storage in farm-type bins. III. Agr. Exp. Sta. Bull. 553, p. 450–496.

Institution of Fire Engineers. 1970. Report on two silo fires. Institution of Fire Engineers Quarterly 30:103–108.

Jackson, C.R. 1967. Influence of drying and harvesting procedures on fungus populations and aflatoxin production in peanut in Georgia. Phytopathology 57:458–462.

Jenike, A.W. 1967. Denting of circular bins with eccentric drawpoints. Proc. Amer. Soc. Civil Engineers Structural Division 93:27–33.

Jonas, M. 1979. The quiet killer. Country Guide. Octobre 1979. p. 18H, 19.

King, A.D. Jr.; Pitt, J.I.; Beuchat, L.R.; Corry, J.E.L. (éditeurs) 1986. Methods for the mycological examination of food. Plenum Press, New York. 315 pp.

Knight, K.G. (éditeur) 1985. Lloyd's survey handbook. 4th edn. Lloyd's of London Press, Royaume-Uni. 294 p.

Koegel, R.G. et Bruhn, H.D. 1971. Inherent causes of spontaneous ignition in silos. ASAE Trans 14:273–276, 281.

Kramer, H.A. 1968. Sampling of wheat, soybeans and corn transported in covered hopper cars. US Dept Agriculture. ARS Special Rept. 51–20, 37 p.

Kramer, N.W. 1959. Sorghum p. 120–136. *In* S.A. Matz (éditeur) The chemistry and technology of cereals as food and feed. AVI, Westport, CT.

Kreyger, J. 1972. Drying and storing grains, seeds and pulses in temperature climates. Inst. for Storage and Processing Agricultural produce, Wageningen, Pays-Bas. Publ. 205. 333 p.

Kunze, O.R. et Calderwood, D.L. 1980. Systems for drying of rice. p. 209–233 *In* C.W. Hall (éditeur) Drying and storage of agricultural crops. AVI, Westport, CT, 382 p.

Lacey, J. 1971. The microbiology of moist barley storage in unsealed silos. Ann. appl. Biol. 69:187–212.

Laewer, O.J., Ross, I.J. et White, G.M. 1981. Aeration, inspection and sampling of grain in storage bins. Univ. Kentucky, Lexington, KY. Cooperative Extension Publ. AEN–45, 14 p.

Larmour, R.K., Sallans, H.R. et Craig, B.M. 1944. Respiration of whole and dehulled sunflowerseed and of flaxseed. Can. J. Res. 22(F):9–18.

Loschiavo, S.R. (éditeur) 1984. Insectes, acariens et moisissures nuisibles aux grains entreposés à la ferme dans les provinces des Prairies. Agr. Can. Publ. 1595F, Ottawa. 34 p.

Loschiavo, S.R. et Atkinson, J.M. 1973. An improved trap to detect beetles (Coleoptera) in stored grain. Can. Ent. 105:437–440.

Löwe, R. et Friedrich, W. 1982. Das Lagerverhalten von Pressfutter (the storage behavior of pelletized feed). Die Muehle und Mischfuttertechnik 119:501–502, 505–506 (en allemand).

Lowe, R. et Friedrich, W. 1983. Das Lagerverhalten von Pressfutter in silozellen. (the storage behavior of pelletized feed in silo bins) Kraftfutter 66:94, 96, 98 (en allemand).

Lyster, B. 1978. How to store rapeseed. Country Guide. Juillet 1978, p. 34–35.

Lyster, B. 1983. Behind the bin wall. Country Guide. Février 1983, p. 35–36.

MacDonald, R. 1976. Law and the lay-person. Courts and trials. Community Law Program, Faculty of Law, Univ. Windsor, Ont., 33 p.

Mackay, P.J. 1967. Theory of moisture in stored produce. Trop. Stored Prod. Inf. 13:9–14.

Manfreda, J. et Warren, C.P.W. 1984. The effects of grain dust on health. Reviews of Environmental Health 4:239–267.

Manitoba Agriculture. 1986. Field crop production recommendations for Manitoba. Winnipeg. 79 p.

Mannon, J. et Johnson, E. 1985. Fungi down the farm. New Scientist 28 février 1985, p. 12–16.

Marshall, E. 1983. Yellow rain experts battle over corn mold. Science 221:526–529.

Martin, P.M.D. 1976. A consideration of the mycotoxin hypothesis with special reference to the mycoflora of maize, sorghum, wheat and groundnuts. Publ. G 105. Tropical Products Institute, Londres, 112 p.

Mazza, G. 1978. Lipid content and fatty acid composition of buckwheat seed. Cereal Chem. 65(2):122–126.

Medders, L.R. 1975. Fire detection systems on oil mills. Oil Mill Gazetteer 80:24–28.

McKenzie, B.A., Van Fossen, L. et Stockdale, H.J. 1980. Managing dry grain in storage. Agricultural Engineers Digest 20, 10 p.

Meeker, D. 1979. Fire fighting. p. 500–506. *In* B.S. Miller and Y. Pomerantz (éditeurs) Proceedings of the International Symposium on Grain Dust. Kansas State Univ., Manhattan, KS.

Meronuck, R.A. 1984. Losses due to spoutline cores in grain bins. Grain Quality Newsletter 6(2):20.

Mills, J.T. 1980. Bin fires: a case history. Country Guide. Août 1980, p. 27–28.

Mills, J.T. et Abramson, D. 1981. Microflora and condition of flood-damaged grains in Manitoba, Canada. Mycopathologia 73:143–152.

Mills, J.T. et Chong, J. 1977. Ultrastructure and mineral distribution in heat-damaged rapeseed. Can. J. Plant Sci. 57:21–30.

Mills, J.T. et Sinha, R.N. 1980. Safe storage periods for farm-stored rapeseed based on mycological and biochemical assessment. Phytopathology 70:541–547.

Mills, J.T. et Wallace, H.A.H. 1979. Microflora and condition of cereal seeds after a wet harvest. Can. J. Plant Sci. 59:645–651.

Mills, J.T., Clear, K.M. et Daun, J.K. 1984. Storability of frost-damaged canola. Can. J. Plant Sci. 64:529–536.

Milner, M. et Thompson, J.B. 1954. Grain storage: physical and chemical consequences of advanced spontaneous heating in stored soybeans. J. Agric. Fd. Chem. 2:303–309.

Milton, R.F. et Jarrett, K.J. 1969. Storage and transport of maize — I. temperature, humidity and microbiological spoilage. World Crops 21:356–357.

Milton, R.F. et Jarrett, K.J. 1970. The storage and transport of Maize — III World Crops 22:96–99.

Mirocha, C.J. et Christensen, C.M. 1982. Mycotoxins p. 241–280. *In* C.M. Christensen (éditeur) Storage of cereal grains and their products. Amer. Assoc. Cereal Chem., St.Paul., MN.

Monro, H.A.U. 1969. Insect pests in cargo ships. Canada Dept Agriculture Publ. 855. 37 p.

Morris, D.T., Hunter, R.B. et McLaughlin, R.J. 1981. Corn Production. Ontario Ministry of Agriculture and Food Publ. 13. 24 p.

Moser, L.E. 1980. Quality of forage as affected by post-harvest storage and processing p. 227–260. *In* C.S. Hoveland (éditeur) Crop quality, storage and utilization. American Soc. of Agronomy, Madison, WIS.

Moysey, E.B. 1973. Storage and drying of oilseeds p. 229–250. *In* R.N. Sinha and W.E. Muir (éditeurs). Grain storage — part of a system. AVI, Westport, CT.

Moysey, E.B. et Norum, E.R. 1975. Storage, drying and handling of oilseeds and pulse crops. p. 507–540. *In* J.T. Harapiak (éditeur) Oilseed and pulse crops in western Canada — a symposium. Western Cooperative Fertilizers Ltd., Calgary.

Muckle, T.B. et Stirling, H.G. 1971. Review of the drying of cereals and legumes in the tropics. Trop. Stored Prod. Inf. 22:11-30.

Muir, W.E., Sinha, R.N. et Wallace, H.A.H. 1973. Abiotic and biotic characteristics of grain stored in temporary farm bins. Can. Agric. Eng. 15:35–42.

Murphy, D.J. et Arble, W.C. 1982. Extinguishing silo fires. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Cornell University, Ithaca, N.Y. Publ. NRAES–18.

Nash, M.J. 1978. Crop conservation and storage in cool temperate climates. Pergamon Press. Oxford. 393 p.

National Fire Protection Association. 1949. Table of materials subject to spontaneous heating. Nat. Fire Protect. Assoc. Publ. 492, p. 713– 720.

National Fire Protection Association. 1981. Fire Protection Handbook. 15th edn. Nat. Fire Protect. Assoc., Quincy, MA, 2022 p.

National Institute for Occupational Safety and Health. 1983. Occupational Safety in grain elevators and feed mills. US Dep. Health Hum. Serv. (NIOSH) Publ. 83–126. Morgantown, W.Va. 85 p.

National Institute for Occupational Safety and Health. 1985. NIOSH alert: Request for assistance in preventing hazards in the use of water spray (fog) streams to prevent or control ignition of inflammable atmospheres. US Dep. Health Hum. Serv. (NIOSH) Publ. 85–112. Morgantown, W.Va. 4p.

National Institute for Occupational Safety and Health. 1986. NIOSH alert: Request for assistance in preventing fatalities due to fires and explosions in oxygen-limiting silos. US Dep. Health Hum. Serv. (NIOSH) Publ. 86-118. Morgantown, W.Va. 6p.

National Safety Council. 1962. Food bins and tanks. N.S.C. Data Sheet 524. 6 p.

Navarro, S. et Friedlander, A. 1979. Spontaneous heating of stored cotton seeds. Progress Rept Stored Products Division 1978–1979, Ministry of Agriculture, Bet Degan, Israel. Special publ. 140. p. 91–102.

Navarro, S. et Paster, N. 1978. Proper aeration prevents self-heating of stored cotton seed. Hassadeh 58:954–960.

Navarro, S., Paster, N. et Carmi, Y. 1982. Prevention of condensation damage to peanuts shipped in containers. Progress Rept Stored Products Division 1980–1981, Ministry of Agriculture, Bet Degan, Israel. Special Publ. 199, p. 15.

Nichols, A.A. et Leaver, C.W. 1966. Methods of examining damp grain at harvest and after sealed and open storage: changes in the microflora of damp grain during sealed storage. J. Appl. Bact. 29:566–581.

Nicholls, C.L.G. 1984. Practical fire fighting in ships. Fire Protection 11(3): 18-23.

Okagbue, R.N. 1986. Fungal deterioration of dried barley malt in international trade. Int. Biodeterioration 22:111–112.

Palmgren, M.S. et Lee, L.S. 1986. Separation of mycotoxin-containing sources in grain dust and determination of their mycotoxin potential. Environmental Health Perspectives 66:105–108.

Paulsen, M.R. et Hill, L.D. 1977. Corn breakage in overseas shipments — two case studies. ASAE Trans 20:550–557.

Pier, A.C., Richard, J.L. et Cysewski, S.J. 1980. Implications of mycotoxins in animal diseases. J. Am. Vet. Med. Assoc. 176:719–724.

Pixton, S.W. 1982. The importance of moisture and equilibrium relative humidity in stored products. Trop. Stored Prod. Inf. 43:16–29.

Pos, J. 1980. Agricultural materials handling manual. Part 6, storage facilities. Section 6.2, types of storage. Agric. Can. Publ. 5002, 39 p.

Prairie Agricultural Machinery Institute. 1981. Labtronics 919 grain moisture meter. PAMI evaluation rept E2379H 5 p.

Ramsted, P.E. et Geddes, W.F. 1942. The respiration and storage behavior of soybeans. Univ. Minn. Ag. Exp. Sta. Tech. Bull. 156. 54 p.

Ravenet, J. 1978. Silos II. Deformations-failures explosions-accident prevention. Editores Técnicos Associados S.A., Barcelona, Spain, 364 p.

Reanney, E.W. 1969. Fire fighting on ships. Brown, Son and Ferguson, Ltd., Glasgow, 168 p.

Rispin, D.G. 1978. Detection of grain silo fires using thermography pB51–53, *In* Proc. 4th Biennal Infrared Information Exchange. AGA Corp., Secausus, NJ.

Robertson, J.A., Chapman, G.W. Jr. et Wilson, R.L. 1984. Effect of moisture content of oil type sunflower seed on fungal growth and seed quality during storage. JAOCS 61:768–771.

Robertson, J.A., Roberts, R.G. et Chapman, G.W. Jr. 1985*a*. Changes in oil-type sunflowerseed stored at 20 °C at three moisture levels. JAOCS 62:1335-1339.

Robertson, J.A., Roberts, R.G. et Chapman, G.W. Jr. 1985*b*. An evaluation of "heat damage" and fungi in relation to sunflower seed quality. Phytopathology 75:142–145.

Rozsa, T.A. 1976. Rye milling p. 111–125. *In* W. Bushuk (éditeur) Rye: production chemistry and technology. American Assoc. of Cereal Chemists Inc., St.Paul, MN.

Rushbrook, F. 1979. Fire aboard. The problems of prevention and control in ships, ports installations and offshore structures. 2nd edn. Brown, Son and Ferguson, Ltd., Glasgow, 638 p.

Schiefer, H.B. et O'Ferrall, B.K. 1981. Alleged mycotoxicosis in swine: review of a court case. Can. Vet. J. 22:134–139.

Scott, P.M., Trenholm, H.L. et Sutton, M.D. (éditeurs) 1985. Mycotoxins: a Canadian perspective. National Research Council Canada, Ottawa, Ontario. Pub. 22848. 185 p.

Semeniuk, G. 1954. Microflora p.77–151. *In* J.A. Anderson and A.W. Alcock (éditeurs) Storage of cereal grains and their products. Amer. Assoc. Cereal Chem., St.Paul, MN.

Shands, H.L. 1959. Rye p. 96–119. *In* S.A. Matz (éditeur) The chemistry and technology of cereals as food and feed. AVI, Westport, CT.

Singley, M.W. 1968. An explosion in a silo. Agric. Engineering. St.Joseph, MI. Janvier 1968. p. 24.

Sinha, R.N. 1973. Interrelations of physical, chemical and biological variables in the deterioration of stored grains. p. 15–47. *In* R.N. Sinha and W.E. Muir (éditeurs) Grain storage: part of a system. AVI, Westport, CT.

Sinha, R.N. et Wallace, H.A.H. 1965. Ecology of a fungus-induced hot spot in stored grain. Can. J. Plant Sci. 45:48–59.

Sinha, R.N. et Wallace, H.A.H. 1973. Population dynamics of stored-product mites. Oecologia (Berl.) 12:315–327.

Sinha, R.N. et Wallace, H.A.H. 1977. Storage stability of farm–stored rapeseed and barley. Can. J. Plant Sci. 57:351–365.

Sinha, R.N. et Watters, F.L. 1985. Insectes nuisibles des minoteries, des silos-élévateurs, des usines à provendes et méthodes de désinfestation. Agric. Can. Publ. 1776F. 310 p.

Sinha, R.N. et White, N.D.G. 1982. Moisture relations of stored triticale and its susceptibility to infestation by mites and infection by microflora. Can. J. Plant Sci. 62:351–360.

Sinha, R.N., White, N.D.G., Wallace, H.A.H. et McKenzie, R.I.H. 1979. Effect of moisture content on viability and infestation of hulless Terra oats in storage. Can. J. Plant Sci. 59:911–916.

Sinkwich, J. et Jamieson, G. 1982. Legal manual for journalists. Law Society of Manitoba, Winnipeg, 254 p.

Snow, D., Crichton, M.H.G. et Wright, N.C. 1944. Mould deterioration of feed stuffs in relation to humidity of storage. Part II. The water uptake of feeding-stuffs at different humidities. Ann. Appl. Biol. 31:111–116.

Sorenson, J.W. Jr. et Person, N.K. Jr. 1970. Drying, storing and handling sorghum grain p. 469–506. *In* S.J. Wall et W.M. Ross (éditeurs) Sorghum production and utilization. AVI, Westport, CT.

Stanton, J. 1987. The Green Hill Park disaster. The Beaver, Avril/Mai: 26-36.

Stanton, T.R. 1959. Oats p. 59–75. *In* S.A. Matz (éditeur) The chemistry and technology of cereals as food and feed. AVI, Westport, CT.

Statistics Canada. 1985. Exports by commodities. Décembre 1985. Catalog 65–004 monthly Ottawa, 372 p.

Steffe, J.F., Singh, R.P. et Miller, G.E. 1980. Harvest, drying and storage of rough rice p. 311–359. *In* B.S. Luh (éditeur) Rice : production and utilization. AVI, Westport, CT.

Taylor, H.D. et Pucill, P.M. 1982. Problems of fire control on board ships. Fire Prevention 151:15–21.

Theakston, F.H. 1972. Preventing corrosion by acid treated grain. Agric. Can. Canadex 731. 2 p.

Tuite, J.F. et Christensen, C.M. 1955. Grain storage studies XVI. Influence of storage conditions upon the fungus flora of barley seed. Cereal Chem. 32:1–11.

Tuite, J.F. et Foster, G.H. 1979. Control of storage diseases of grain. Ann. Rev. Phytopathol. 17:343–366.

United Kingdom Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. 1970. Field beans, H.M.S.O. Pinner, Middlesex, England, 17 p.

United States Department of Agriculture. 1972. Grain inspection manual. Agric. Mark. Serv., Washington, D.C. 245 p.

United States Department of Agriculture. 1978. Official United States standards for grain. Agri. Mark. Serv., Washington, DC 64 p.

University of Kentucky. 1984. Management of on-farm stored grain. College of Agriculture, Cooperative Extension Service, Lexington, KY, 92 p.

Walker, I.K. 1961. Spontaneous ignition of spent brewing grains. N. Zealand J. Science 4:230–247.

Wallace, H.A.H. 1973. Fungi and other organisms associated with stored grain p. 71–98. *In* R.N. Sinha et W.E. Muir (éditeurs) Grain storage: part of a system. AVI, Westport, CT.

Wallace, H.A.H., Sholberg, P.L., Sinha, R.N. et Muir, W.E. 1983. Biological, physical and chemical changes in stored wheat. Mycopathologia 82:65–76.

Wallace, H.A.H., Sinha, R.N., Laliberté, G.E., Fraser, B.M., Sholberg, P.L. et Muir, W.E. 1979. Biological, physical and chemical changes in stored fababeans, Can. J. Sci. 59:991–999.

Want Publishing Co. 1984. Guide to the federal courts: an introduction to the federal courts and their operation. Washington, DC, 103 p.

Waterer, D., Muir W.E. et Sinha, R.N. 1985. Electrical resistance probe for detecting stored grain deterioration. Can. Agric. Eng. 27:73–77.

Welch, R.W. 1977. The development of rancidity in husked and naked oats after storage under various conditions. J. Sci. Fd. Agric. 28:269– 274.

Western Producer. 1977. Prussic acid danger noted in storing damp flaxseed. West. Producer 20 novembre.

White, N.D.G. et Jayas, D. 1989? Safe storage conditions and infestation of canola meal by fungi and insects. J. Stored Prod. Res. [in press].

Whitten, M.E. 1981. Storage, handling and quality evaluation of cotton seed p. 457–460. *In* E.E. Finney (éditeur) CRC Handbook for transportation and marketing in Agriculture, Vol II Field crops. CRC Press, Boca Raton, FL.

Wilkins, D. 1983. Safe storage of wheat. Country Guide. Septembre 1983. p. 30A, 30D.

Wilkins, D. 1984. Clearing the air. Country Guide, Hog Guide Edn. Mai 1984. p. H18–H20.

Wilkins, D. 1985a. An early warning spoilage test. Country Guide. Juillet 1985. p. 20–22.

Wilkins, D. 1985b. Safflower: another alternative cash crop. Country Guide, Août 1985. p. 34–35.

Wilkins, D. 1986. Could this happen to you? Country Guide. Mai 1986. p. 34D, 34H, 37.

Winnipeg Free Press. 1978. Special crops have new storage needs. Free Press Report on Farming. Feb: 23B.

Wishna, S. 1979. Detection of potential heat ignition sources by thermography p. 367–375. *In* B.S. Miller et Y. Pomerantz (éditeurs) Proceedings of the International Symposium on Grain Dust. Kansas State Univ., Manhattan, KS.

Annexe A

Table de conversion des températures

°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F
0	32	36	96,8	72	161,6	108	226,4	144	291,2
1	33,8	37	98,7	73	163,4	109	228,2	145	293
2	35,6	38	100,4	74	165,2	110	230	146	294,8
3	37,4	39	102,2	75	167	111	231,8	147	296,6
4	39,2	40	104	76	168,8	112	233,6	148	298,4
5	41	41	105,8	77	170,6	113	235,4	149	300,2
6	42,8	42	107,6	78	172,4	114	237,2	150	302
7	44,6	43	109,4	79	174,2	115	239	151	303,8
8	46,4	44	111,2	80	176	116	240,8	152	305,6
9	48,2	45	113	81	177,8	117	242,6	153	307,4
10	50	46	114,8	82	179,6	118	244,4	154	309,2
11	51,8	47	116,6	83	181,4	119	246,2	155	311
12	53,6	48	118,4	84	183,2	120	248	156	312,8
13	55,4	49	120,2	85	185	121	249,8	157	314,6
14	57,2	50	122	86	186,8	122	251,6	158	316,4
15	59	51	123,8	87	188,6	123	253,4	159	318,2
16	60,8	52	125,6	88	190,4	124	255,2	160	320
17	62,6	53	127,4	89	192,2	125	257	161	321,8
18	64,4	54	129,2	90	194	126	258,8	162	323,6
19	66,2	55	131	91	195,8	127	260,6	163	325,4
20	68	56	132,8	92	197,6	128	262,4	164	327,2
21	69,8	57	134,6	93	199,4	129	264,2	165	329
22	71,6	58	136,4	94	201,2	130	266	166	330,8
23	73,4	59	138,2	95	203	131	267,8	167	332,6
24	75,2	60	140	96	204,8	132	269,6	168	334,4
25	77	61	141,8	97	206,6	133	271,4	169	336,2
26	78,8	62	143,6	98	208,4	134	273,2	170	338
27	80,6	63	145,4	99	210,2	135	275	171	339,8
28	82,4	64	147,2	100	212	136	276,8	172	341,6
29	84,2	65	149	101	213,8	137	278,6	173	343,4
30	86	66	150,8	102	215,6	138	280,4	174	345,2
31	87,8	67	152,6	103	217,4	139	282,2	175	347
32	89,6	68	154,4	104	219,2	140	284	176	348,8
33	91,4	69	156,2	105	221	141	285,8	177	350,6
34	93,2	70	158	106	222,8	142	287,6	178	352,4
35	95	71	159,8	107	224,6	143	289,4	179	354,2

Adresses des associations de prévention et de protection des incendies

Australian Fire Protection Association
2 Arden Street
North Melbourne
Victoria 3051,
Australia

Fire Prevention Canada Association
1590-7 Liverpool Court
Ottawa, Ontario
Canada
K1B 4L2

Centre national de prévention et de protection
5, rue Daunou
75002 Paris
France

Japan Fire Protection Association
Nippon Shobo Kaikan
5th Floor
9-16 Toranomon 2-Chome
Minato-Ku
Tokyo 105
Japan

Asociación de investigación para la seguridad de vidas y bienes
Centro nacional de prevension de daños y perdidas
Sagasta 18
Madrid 4
Spain

Fire Protection Association
140 Aldersgate Street
London EC1A 4HX
England

National Fire Protection Association
Batterymarch Park
Quincy, Mass. 002269
U.S.A.

Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandshuttzes e.V.
Westphalensweg 1
2000 Hamburg 1
West Germany

INDEX

NOTA : Les numéros de pages suivis d'un *t* renvoient au tableau de ces pages. Les numéros en italique renvoient aux figures qui apparaissent à ces pages. Les numéros en caractères gras indiquent que les sujets sont surtout développés dans ces pages.

Canadä